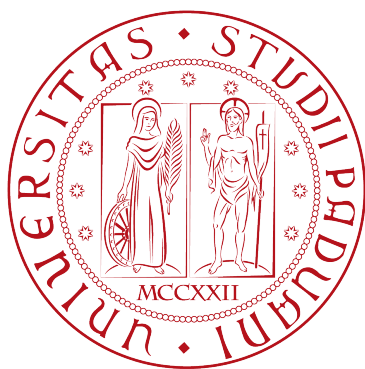




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

**Progetto termico e pneumatico dell'esperimento
O-Zone per il programma BEXUS/REXUS**

RELATORE:

PROF. ALESSANDRO FRANCESCONI

CANDIDATO:

MAURO PULICE

1217520

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

*“A lesson without pain is meaningless.
That’s because no one can gain without sacrificing something.”*
– Fullmetal Alchemist, capitolo 1

Ringraziamenti

Le prime persone che voglio ringraziare sono i miei genitori e le mie sorelle, che hanno reso questo percorso possibile. Senza voi niente di tutto questo sarebbe successo ed oggi non saremmo qui a festeggiare.

Voglio inoltre ringraziare l'intero team O-Zone, a partire dal professor Francesconi e da Lorenzo Olivieri, che hanno supportato sia il team durante il progetto che me durante la tesi.

Federico, Dumi e tutti gli altri: O-Zone è stata la parte più bella non solo della magistrale, ma di tutta l'esperienza universitaria, e non vi ringrazierò mai abbastanza per aver reso questo progetto una realtà.

Gli ultimi ringraziamenti vanno a Mattia, Riccardo, Casa Castello/Questura, Carlo, Giacomo e a tutti gli amici che hanno reso più interessante e bella quest'esperienza.

Una menzione speciale va però a due persone in particolare:

la prima è Carlotta, visto che senza di lei questa tesi sarebbe un'accozzaglia di tabelle mal fatte e disperazione; inoltre il suo costante supporto negli ultimi due anni si è dimostrato più volte fondamentale e continua ad esserlo.

La seconda, ma non per importanza, è Andrea: il ruolo che hai avuto in questi anni e che hai tutt'ora è difficilmente esprimibile in poche righe, perché anche nei momenti in cui andava tutto storto, sei sempre stato presente e ti sei sempre impegnato per far stare bene le persone attorno a te; raramente si incontrano persone come te, ma evidentemente sono stato abbastanza fortunato.

Indice

Ringraziamenti	V
1 Introduzione	1
1.1 Progetto BEXUS	1
1.2 Obiettivo dell'esperimento	2
1.3 Process flow	3
1.4 Descrizione del dispositivo in macrosettori	7
1.5 Metodo di sviluppo	8
1.6 Storia dell'esperimento	10
2 Design Sottosistema Pneumatico	13
2.1 Requisiti	13
2.1.1 Requisiti funzionali	13
2.1.2 Requisiti prestazionali	14
2.1.3 Requisiti di design	14
2.1.4 Requisiti operativi	15
2.2 Sistema pneumatico	15
2.3 Componenti	19
2.3.1 Pompa	19
2.3.2 Elettrovalvole	23
2.4 Regolazione del flusso	24
2.5 Rischi	25
2.6 Test eseguiti	29
2.6.1 Pompa in camera vuoto	29
2.6.2 Sistema pneumatico	30
2.6.3 Bassa pressione	31
2.6.4 Tenuta del canister	32

2.6.5	Dimensioni	33
2.6.6	Peso	34
2.7	Problematiche	34
3	Design Sottosistema Termico	37
3.1	Requisiti	37
3.2	Range operativi dei componenti	38
3.3	Documentazione su Kiruna	39
3.3.1	Temperatura di rugiada e possibile condensazione nei tubi	39
3.4	Framework dei calcoli	41
3.4.1	Worst Hot Case	43
3.4.2	Worst Cold Case	44
3.5	Soluzione Passive	45
3.5.1	Pannelli	45
3.5.1.1	Scelta dei materiali	45
3.5.2	Treccia in rame	46
3.6	Soluzioni attive	46
3.6.1	Heaters	46
3.7	Rischi	48
3.8	Test eseguiti	49
3.8.1	Pompa in camera vuoto	49
3.8.2	Test termico	49
3.9	Problematiche	50
4	Campagna di lancio e risultati	51
4.1	Performance del dispositivo	51
4.2	Performance del sistema pneumatico	51
4.3	Performance della parte termica	52
4.4	Dati raccolti	52
4.5	Materiale scientifico prodotto	54
5	Conclusioni	55
	Bibliografia	57

Elenco delle figure

1.1	Box con sottosistemi pneumatico ed elettronico in vista (prototipo)	3
1.2	Sistema interno	4
1.3	Process flow dell'esperimento	4
1.4	Vista del sottosistema pneumatico	6
1.5	Diagramma delle connessioni pneumatiche	6
1.6	Interno prototipo O-Zone	6
1.7	Vista superiore della gondola	8
1.8	Vista degli ammortizzatori in gomma	9
1.9	Vista fondo	9
2.1	Sottosistema pneumatico CAD	17
2.2	Sottosistema pneumatico reale	18
2.3	Performance prima pompa rispetto alla pressione	20
2.4	Performance pompa definitiva rispetto alla pressione	21
2.5	Dimensioni prima pompa	21
2.6	Dimensioni pompa definitiva	22
2.7	Valvola VDW20QAP	23
2.8	Valvole in configurazione definitiva	24
2.9	Circuito a 3 vie del canale pre-canister	35
2.10	Circuito in fase di svuotamento del tubo	36
3.1	Punto di rugiada a diversa umidità relativa	40
3.2	Curve del punto di rugiada	40
3.3	Profilo di temperatura della superficie esterna del tubo in alluminio	41
3.4	Vista laterale di un pannello esterno: Polistirene e foglio in alluminio	46
3.5	Heater da 127 ohm apposto sulla piastra di base	47
3.6	Grafico: Watt/cm quadrato in relazione alla temperatura superficiale	48

4.1	Pressione registrata durante il volo	52
4.2	Temperatura esterna misurata in volo	53
4.3	Temperatura interna misurata in volo	53

Elenco delle tabelle

2.1	Tabella Componenti Pneumatici	19
2.2	Tabella Caratteristiche Tecniche Prima Pompa	19
2.3	Tabella Caratteristiche Tecniche Pompa Definitiva	20
2.4	Tabella dei rischi	29
2.5	Procedura test 1	30
2.6	Procedura test 2	31
2.7	Procedura test 3	32
2.8	Procedura test 4	33
2.9	Procedura test 5	34
2.10	Procedura test 6	34
3.1	Requisiti termici Componente Intervallo di temperatura operativa (°C)	38
4.1	Performace Dispositivo	51

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Progetto BEXUS

L'elaborato ha l'obiettivo di fornire la descrizione del design termico e pneumatico del prototipo O-Zone, sviluppato nel contesto del progetto BEXUS. Come riportato sul BEXUS User Manual [2], il programma REXUS/BEXUS consente agli studenti delle università e degli istituti di istruzione superiore di tutta Europa di effettuare esperimenti scientifici e tecnologici su razzi e palloni da ricerca. Ogni anno vengono lanciati due razzi e due palloni stratosferici, che trasportano fino a 20 esperimenti progettati e costruiti da squadre di studenti. Il programma REXUS/BEXUS è realizzato nell'ambito di un accordo bilaterale tra il Centro aerospaziale tedesco (DLR) e l'Agenzia spaziale nazionale svedese (SNSA). La quota svedese del carico utile è stata messa a disposizione degli studenti di altri paesi europei attraverso una collaborazione con l'Agenzia spaziale europea (ESA). Esrange Space Center di SSC è responsabile della gestione della campagna e delle operazioni del veicolo di lancio BEXUS. Esperti di DLR, DLR MORABA, SSC, ZARM ed ESA forniscono supporto tecnico ai team di studenti durante tutto il progetto. Gli esperimenti BEXUS volano con un pallone stratosferico dal volume di 12.000 m³ ad un'altitudine di 25-30 km, a seconda della massa totale dell'esperimento (40-100 kg). La durata del volo varia fra le 2 e le 5 ore. La gondola BEXUS è modulare per fornire interfacce semplici, buona flessibilità e indipendenza tra gli esperimenti. Tutti i sistemi di servizio del carico utile necessari per le telecomunicazioni, il controllo del carico utile e il recupero sono inclusi nel sistema. Viene fornita la telemetria ad alta velocità e il controllo dei comandi up-link degli esperimenti.

1.2 Obiettivo dell'esperimento

L'obiettivo dell'esperimento è lo studio degli inquinanti presenti in aria di origine sia antropogenica che naturale attraverso un dispositivo economico e facilmente riproducibile che possa velocemente intervenire per lo studio di aree ben definite. La necessità di apportare un contributo a fronte dei drammatici cambiamenti climatici ha portato il team a definire un prototipo che possa facilitare lo studio dell'ambiente.

Il primo passo dell'esperimento consiste nel campionamento, a diverse altitudini, dell'aria atmosferica raccogliendo, con un sistema di filtri, le particelle solide e le diverse sostanze inquinanti gassose, come ad esempio i composti bromurati. In seguito al volo del pallone atmosferico, i campioni sono stati analizzati e, grazie ai valori di temperatura e pressione, combinati ai dati di posizione in altezza, hanno consentito la caratterizzazione della composizione dell'aria a diverse altitudini e la creazione di curve di dispersione e modelli per ogni composto analizzato. Tali strumenti consentono di predire possibili reazioni in situ e di pensare a possibili soluzioni per l'intervento o la prevenzione.

Ad oggi molti gas Freon hanno già raggiunto le altitudini maggiori dell'atmosfera, mentre i bromurati, più pesanti, hanno un'ascesa più lenta. L'esperimento O-Zone consente di teorizzare modelli per predire l'ascesa ed i possibili impatti sull'ecosistema dell'ozono. Inoltre, avendo verificato le funzionalità del dispositivo, è possibile pensare ad altre applicazioni che non riguardano la caratterizzazione verticale dell'aria ma anche quella orizzontale, ad esempio per monitorare piantagioni, zone industriali e luoghi affetti da disastri naturali di origine sia antropogenica che non.

Il problema dell'inquinamento atmosferico copre una vasta gamma di settori, molti dei quali legati alla salute umana e agli ecosistemi terrestri in generale. Lo studio del fenomeno, per una prevenzione e un intervento mirato, è la migliore risposta che si possa ricercare a favore della soluzione o della mitigazione di questo problema. I modelli precedenti includono missioni satellitari, analisi in situ e precedenti esperimenti innovativi (ad esempio BEXUS). O-Zone intende quindi ampliare le possibilità di studio degli inquinanti al fine di promuovere la consapevolezza ambientale e la ricerca di soluzioni per l'inquinamento atmosferico che minaccia la salute della popolazione.

Gli obiettivi primari di O-Zone erano il campionamento di alcuni inquinanti atmosferici (CFC, COV, SO_x, PM) a diverse altitudini e la raccolta di una quantità nota di aria superiore a 20 km. Questi sono strettamente correlati agli obiettivi secondari, cioè la costruzione di diagrammi di dispersione degli analiti campionati e infine il confronto del nostro modello con altri metodi di

analisi dell'aria esistenti (missioni satellitari, campionamento in situ, precedenti esperimenti innovativi).

1.3 Process flow

Il primo sottosistema di questo esperimento contiene cinque filtri attaccati sulla piastra inferiore, dove sono installati anche la pompa a diaframma e le valvole (Figura 1.2), mentre l'elettronica è installata sulla piastra intermedia. Il secondo sottosistema è un canister (sacchetto di campionamento) collegato alla piastra superiore. Questi due sistemi funzionano indipendentemente l'uno dall'altro, in quanto la pompa e le valvole permettono all'aria di fluire attraverso i filtri durante la fase ascendente; una volta completata la fase di campionamento dell'ultimo filtro, la valvola che conduce al contenitore si apre mentre tutte le altre valvole vengono chiuse, lasciando così fluire l'aria direttamente nel contenitore. Con questi due sistemi (filtri e canister) il team è stato in grado di raccogliere CFC, COV, PM e poi analizzarli in laboratorio.

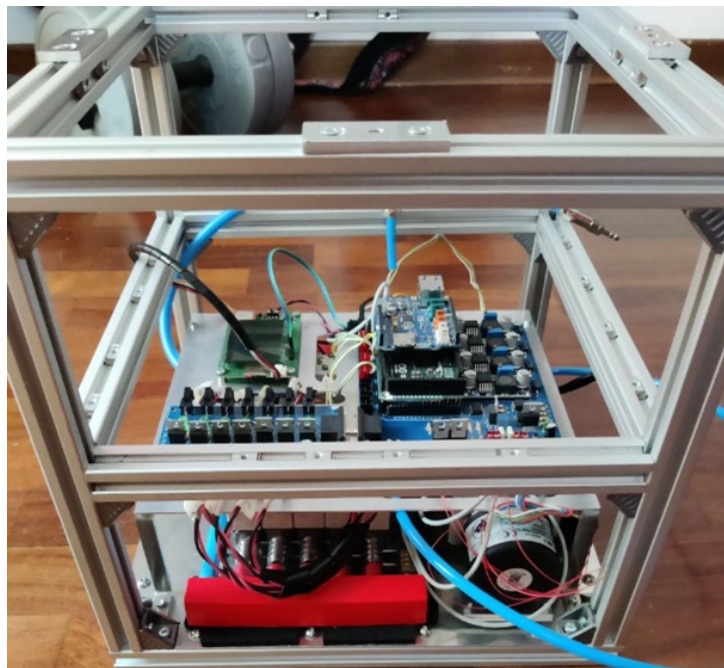


Figura 1.1: Box con sottosistemi pneumatico ed elettronico in vista (prototipo)

Prima di raggiungere i filtri, il flusso d'aria deve passare attraverso un tubo di alluminio riscaldato per garantire che la temperatura dell'aria rispetti i requisiti. Al fine di garantire correttamente un adeguato valore di portata, è stata effettuata la regolazione della pompa, grazie ai dati forniti dal flussometro. Durante il volo, grazie alle valvole e al sistema pneumatico, l'aria è passata attraverso ciascuno dei 5 filtri a seconda dell'altitudine. Possiamo definire il flusso di processo come segue (Figura 1.3):

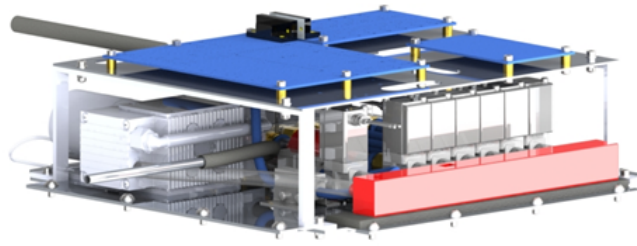


Figura 1.2: Sistema interno

- Tra 0 e 4,5 km il flusso d'aria è passato attraverso il primo filtro raccogliendo il particolato;
- Tra 4,5 e 9 km il flusso d'aria è passato attraverso il secondo filtro di raccolta degli inquinanti;
- Tra 9 e 13,5 km il flusso d'aria è passato attraverso il terzo filtro di raccolta degli inquinanti;
- Tra 13,5 e 18 km il flusso d'aria è passato attraverso il quarto filtro di raccolta degli inquinanti;
- Tra 18 e 22,5 km il flusso d'aria è passato attraverso il quinto filtro di raccolta degli inquinanti;
- Tra 22,5 e 25 km il flusso d'aria ha riempito il canister.

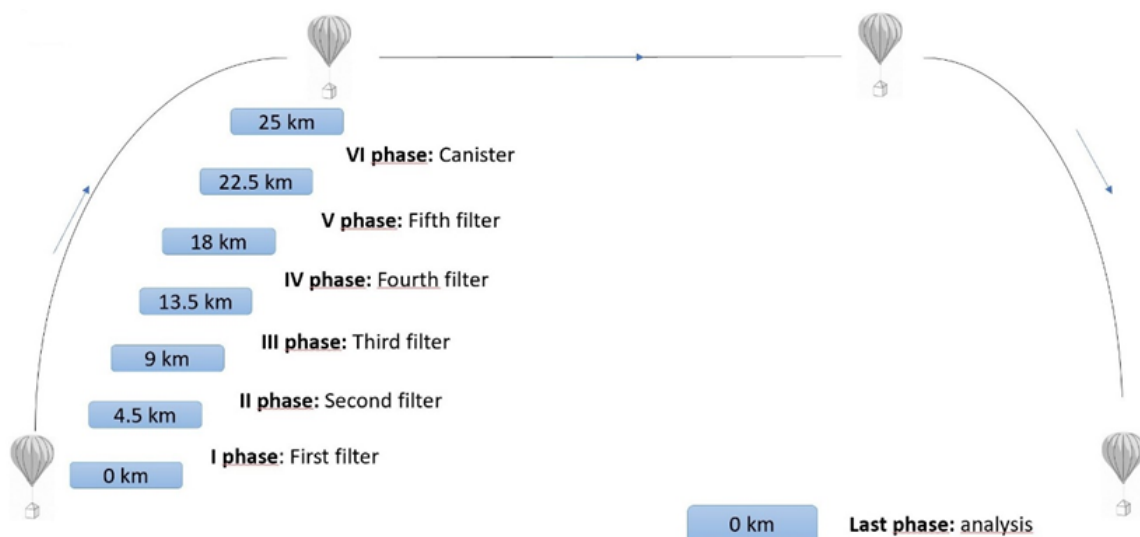


Figura 1.3: Process flow dell'esperimento

Il dispositivo è costituito da diversi sottosistemi: meccanico, pneumatico, termico, elettrico e infine chimico, il cuore del nostro esperimento. Il sottosistema chimico è inteso come la

presenza dei filtri e del sacco di campionamento, che sono stati analizzati dopo l'atterraggio. Il sottosistema chimico è legato al nostro esperimento collegando il sacchetto di campionamento direttamente al primo collettore e posizionando il filtro all'interno del tubo che sono collegati alla scatola di giunzione stessa. Ogni filtro è sigillato ermeticamente da due valvole che vengono aperte all'altitudine richiesta per campionare un determinato filtro. Il filtro che ha campionato l'aria nei primi 4,5 km ha raccolto il particolato, mentre tutti gli altri filtri sono stati dedicati al campionamento degli inquinanti. Tra ogni intervallo di altitudine l'aria è passata attraverso un tubo di scarico senza filtro in modo che le condizioni potessero essere ottimizzate per la fase successiva. L'ultima fase è stata il riempimento del canister, che ha richiesto circa 30 minuti. Una volta riempito, il sacchetto di campionamento è stato sigillato proprio come è stato fatto per ogni filtro dopo la fase di campionamento.

Il sottosistema pneumatico (Figura 1.4) è collegato al sottosistema strutturale/meccanico, poiché tutti i componenti del sistema pneumatico sono direttamente collegati al pannello di alluminio che funge da base per l'installazione dei componenti. Anche il tubo di ingresso è saldamente collegato al pannello esterno in alluminio. Il cuore del sottosistema elettrico è il PC di bordo, un Arduino2. Questo sottosistema è collegato a tutti gli altri sottosistemi: l'arduino2 emette ordini sia per la pompa che per le valvole, regolando anche il controllo termico attivo in base alle informazioni che riceve dalle termocoppie e dai sensori di temperatura interni. L'Arduino2 aveva anche il ruolo chiave di mantenere il riscaldatore del tubo di alluminio alla temperatura corretta in quanto questo era molto importante per riscaldare il flusso d'aria ad un intervallo di temperatura corretto per i filtri (10-25 °C). Il sottosistema strutturale si occupa di allocare tutti i cavi e le connessioni necessarie al dispositivo, sia i cavi interni che quelli esterni. Il sottosistema termico è costituito sia da soluzioni passive che da dispositivi di controllo termico attivi. Altri sensori termici sono posizionati in punti chiave della scatola, come il collettore e la pompa, per garantire che nessun altro componente rischi il surriscaldamento o il raffreddamento eccessivo. Il sensore di temperatura nel collettore è posizionato attraverso un foro appropriato sulla struttura: questa uscita è sigillata con silicone. Questo sottosistema è collegato anche al sistema pneumatico: quando la pompa si surriscalda e deve rallentare, il sensore termico lascia che l'Arduino2 emetta un ordine per modulare il flusso d'aria e lasciare che la pompa funzioni a un ritmo più blando.

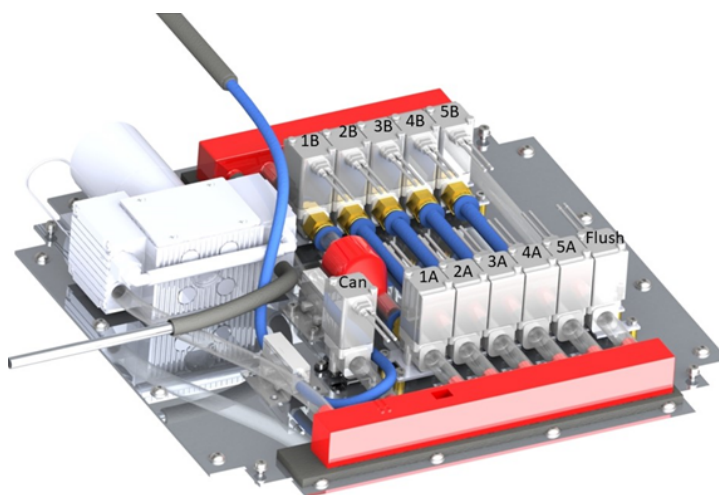


Figura 1.4: Vista del sottosistema pneumatico

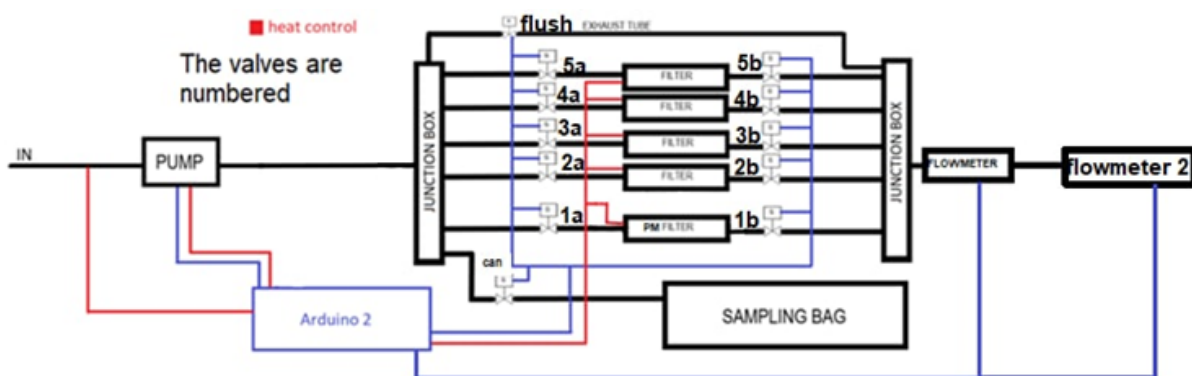


Figura 1.5: Diagramma delle connessioni pneumatiche

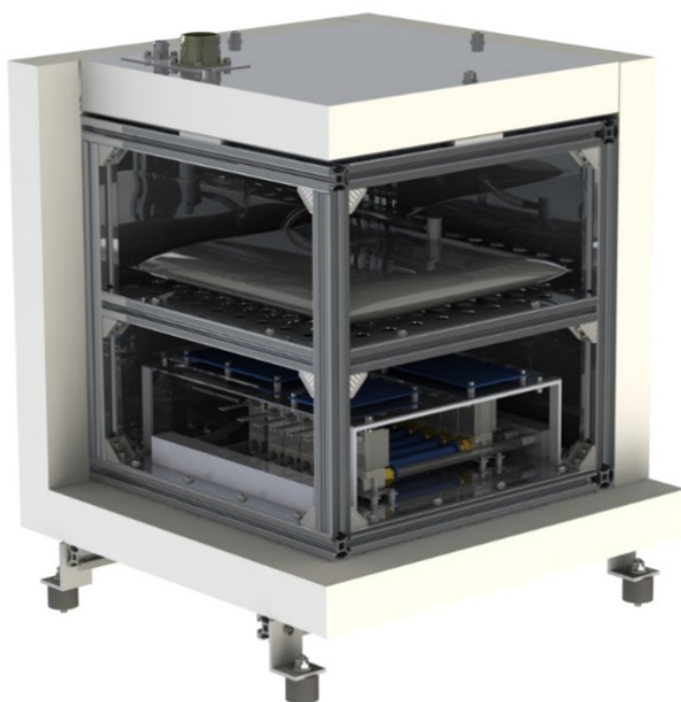


Figura 1.6: Interno prototipo O-Zone

1.4 Descrizione del dispositivo in macrosettori

Il dispositivo è stato progettato seguendo la suddivisione in diversi macrosettori:

- **Sistema meccanico:**

- Interfacce e sistema di ancoraggio
- Frame
- Pannelli

- **Sottosistema elettrico:**

- PCU
- Sensori
- E-Link connettore

- **Sottosistema pneumatico:**

- Pompa
- Valvole
- Tubi

- **Sottosistema termico:**

- PTCS
- ATCS

- **Sottosistema chimico:**

- Filtri per inquinanti
- Filtro particolato
- Canister

La scatola dell'esperimento è stata montata sulle rotaie della gondola utilizzando un sistema realizzato con profili Bosch in alluminio e 4 ammortizzatori in gomma (simile ai FIBET 2520VV18-45), come mostrato nel "BEXUS user manual", per ridurre le forze subite durante l'atterraggio e smorzare le vibrazioni. La scatola si trovava nell'angolo in basso a sinistra della gondola (Figura 1.7) mentre gli assorbitori in gomma erano fissati alle rotaie della gondola

come indicato nel manuale d'uso (Figura 1.8). Gli assorbitori in gomma sono stati forniti dall'organizzazione BEXUS. Come si può vedere dall'immagine, anche i profili Bosch utilizzati per collegare la scatola alle guide sono collegati al telaio utilizzando quattro viti M4X65; Ciò implica che i profili in alluminio devono essere forati per consentire il collegamento delle viti. Inoltre, sono stati utilizzati distanziali per aiutare le viti a gestire il peso dell'esperimento durante l'impatto con il terreno. Era stato inizialmente considerato di montare l'esperimento utilizzando quattro molle Enidine® Compact invece di assorbitori in gomma, ma dopo alcuni calcoli è stato scoperto che nessuna di esse sarebbe stata adatta al nostro esperimento a causa del nostro valore di peso (stimato in circa $14\text{Kg} = 140\text{N}$); Inoltre, gli assorbitori in gomma si sono dimostrati più economici e più facili da montare. Nell'Appendice C del documento SED [1] è spiegata la procedura che abbiamo utilizzato per calcolare la forza d'impatto che ciascuna delle 4 viti M4 deve sopportare.

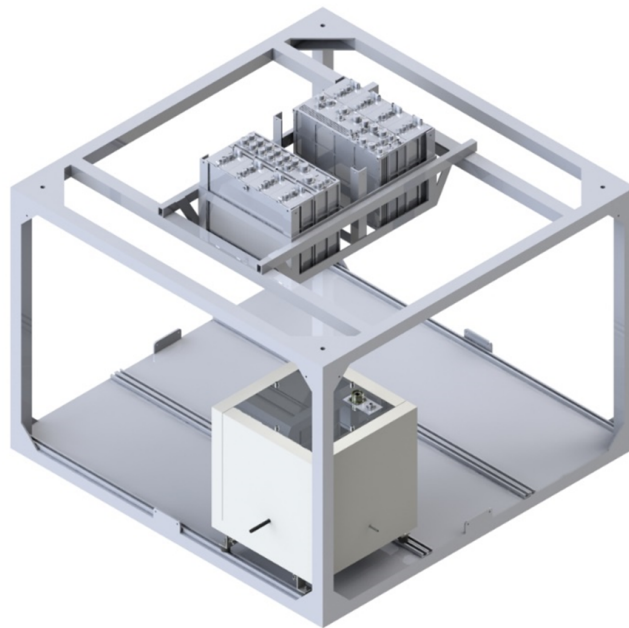


Figura 1.7: Vista superiore della gondola

1.5 Metodo di sviluppo

Il processo di design è stato fortemente caratterizzato dalle procedure del lavoro “agile”, condizione dettata dalla necessità del team di condurre lo sviluppo in maniera remota a causa della situazione pandemica in corso a partire da marzo 2020. Il forte impiego di concurrent engineering ha consentito di ridurre al minimo la fase di re-design dovuta alle interfacce fra diversi macrosettori (EG requisiti termici dei filtri): tale metodo di lavoro prevede un costante

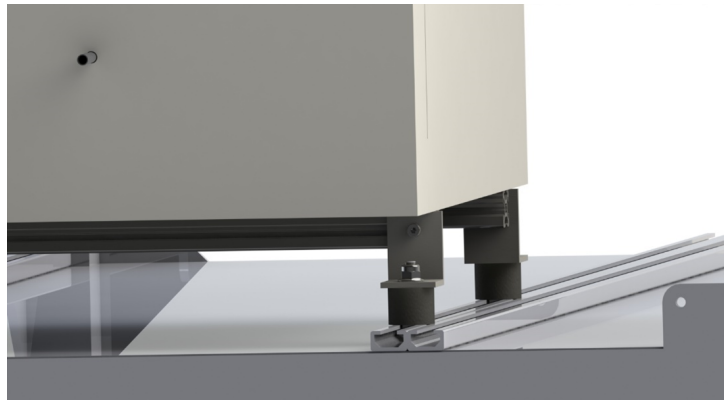


Figura 1.8: Vista degli ammortizzatori in gomma

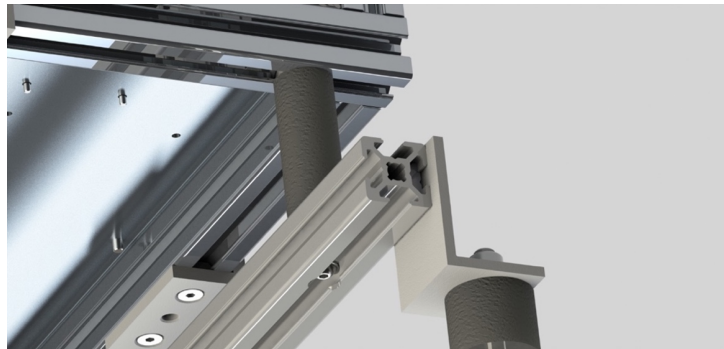


Figura 1.9: Vista fondo

scambio di informazioni fra i diversi reparti del team, in modo che le decisioni di design vengano prese tenendo conto sin dall'inizio delle possibili ripercussioni sugli aspetti caratterizzanti del dispositivo, in particolare della parte chimica che presenta diversi requisiti ambientali. La fase di sviluppo è stata inoltre accompagnata costantemente dalla riproduzione CAD del dispositivo nella sua interezza, in modo tale da avere ben chiari gli ingombri finali esterni ed i possibili spazi utilizzabili sui vari piani del prototipo. Questo è stato un aspetto fondamentale, in quanto l'esperimento presenta numerosi elementi al suo interno, e molte decisioni sono state anche "forzate" da problemi di spazio. Naturalmente alcuni aspetti del prototipo sono stati rilevabili solo dopo la creazione del prototipo stesso (EG la facilità di montaggio/smontaggio del comparto filtri), ma indubbiamente l'impiego di tecniche del lavoro agile ha permesso che le modifiche post-prototipazione fossero ridotte al minimo. Quest'obiettivo, già di per sé molto importante, assume particolare caratura quando si considera che la fase di design è stata svolta quasi interamente da remoto, quindi senza accesso ai pezzi fisici ed ai laboratori per testare i sottoassiemi. Il lancio dell'esperimento sarebbe dovuto avvenire durante la campagna di lancio 2020, ma a causa della situazione COVID globale, tale campagna di lancio è stata cancellata; a quel punto, gli organizzatori e stakeholders dell'esperimento hanno comunque valutato lo stato del prototipo, concedendo comunque un "flight-pass", a certificare che l'esperimento già

ad Agosto 2020 era pronto per il lancio. Nonostante ottenuto il pass fosse possibile per il team congelare l'esperimento, è stato deciso di iniziare un processo di fine-tuning ed aggiornamento dei componenti con le nuove versioni disponibili sul mercato.

1.6 Storia dell'esperimento

La prima idea di O-Zone nasce a Settembre 2019, con l'idea presentata durante la Call for Applications e la conseguente selezione ad ESTEC in Olanda. Subito dopo la selezione, il team O-Zone viene ampliato dalle 4 persone iniziali ad oltre 10. In vista della Preliminary Design Review, il design dell'esperimento è stato leggermente migliorato, ma non abbastanza da ottenere un risultato positivo durante la valutazione: infatti a Kiruna, durante la Student Training Week, il progetto ha ricevuto un Conditional Pass, ovvero una promozione condizionata però da diverse ampie lacune che andavano risolte entro il prossimo evento chiave, la DELTA-PDR. Presa coscienza del lavoro da svolgere, complice anche la stabilizzazione del team dopo un breve periodo di ambientamento, il prototipo supera la DELTA-PDR ed inizia il processo di design più dettagliato in vista della Critical Design Review, lo stage dove la progettazione viene "congelata" a grandi linee; dal passaggio della CDR in poi, le modifiche concesse possono essere solo marginali. E' in preparazione della CDR che il team raggiunge un punto di svolta. A causa del risultato negativo ottenuto in Svezia, la preparazione per la CDR è risultata essere capillare, precisa e soddisfacente sia per il team che per il Board di giudizio, che promuove il progetto a pieni voti, rigenerando la fiducia che era venuta a mancare in precedenza. Il passo successivo è stata la Integration Progress Review (IPR), durante la quale è stato valutato il grado di sviluppo del dispositivo in termini di realizzazione del prototipo stesso. Tale fase è stata anormale rispetto a quanto preventivato dagli organizzatori, in quanto le restrizioni COVID erano state da poco allentate e dunque il materiale da mostrare era limitato. Nonostante queste difficoltà, il team è riuscito a preparare un prototipo e testarlo in anticipo rispetto alla fase successiva e, teoricamente, finale. Tale fase, la Experiment Acceptance Review (EAR) è la fase in cui viene conferito il flight-pass utile per poter effettivamente partecipare al volo stratosferico con il proprio esperimento. Superata anche questa fase, la campagna di lancio viene purtroppo cancellata a causa dell'incombente seconda ondata pandemica, e l'esperimento viene momentaneamente bloccato. La situazione è stata colta dal team come un'opportunità per affinare il prototipo ed aggiornare alcuni componenti con altri più performanti o semplicemente appena usciti sul mercato, come ad esempio la pompa. Durante il secondo anno di sviluppo, gli eventi chiave del percorso sono stati rappresentati da Review intermedie con gli organizzatori, cul-

minate poi con una nuova EAR, anch'essa superata. In questo modo, a Settembre 2021 il lancio del BEXUS ciclo 30 è avvenuto con successo da Kiruna, e dopo alcune ore di volo l'esperimento è atterrato in Finlandia, dove è stato poi recuperato. Il prototipo, in seguito alla caduta, non ha riportato alcun danno ed ogni campione ottenuto (filtri, canister) è rimasto integro, segno della bontà dello sviluppo dello stesso.

Capitolo 2

Design Sottosistema Pneumatico

2.1 Requisiti

Lo sviluppo del prototipo è stato portato avanti partendo dai cardini del funzionamento immaginato per il dispositivo, ovvero il rispetto dei requisiti tecnici. Tali requisiti vengono divisi in diverse categorie: Funzionali (F), Operativi (O), Design (D). Alcuni di questi requisiti vengono imposti dalle condizioni al contorno dell'esperimento (tipo l'ambiente esterno), mentre altri sono imposti dal team stesso per far sì che il prototipo rispetti l'idea originale di dispositivo economico, leggero e accessibile. In particolare, i requisiti relativi alla parte termica e pneumatica sono i seguenti:

2.1.1 Requisiti funzionali

F.1 L'esperimento deve aspirare l'aria atmosferica per mezzo di una pompa.

F.2 L'esperimento deve campionare analiti a diverse altitudini con un sistema di filtri.

F.3 L'esperimento deve raccogliere un volume di aria atmosferica con un contenitore.

F.4 L'esperimento deve misurare il flusso d'aria.

F.5 L'esperimento deve controllare il flusso d'aria.

F.6 L'esperimento deve misurare almeno la temperatura della pompa, l'aria all'interno del collettore e l'aria all'interno dell'esperimento.

F.7 L'esperimento deve essere in grado di controllare la temperatura del flusso in ingresso mediante un sistema di riscaldamento.

F.9 L'esperimento dovrebbe determinarne l'altitudine.

2.1.2 Requisiti prestazionali

- P.1 Il flusso d'aria deve essere misurato con una precisione di almeno $\pm 0,01$ L/min.
- P.2 Il flusso d'aria deve essere misurato con una frequenza di almeno 1 Hz.
- P.3 Il valore minimo del flusso d'aria attraverso i filtri deve essere minimo 0,05 L/min.
- P.4 L'intervallo di misurazione della temperatura deve essere compreso tra -10 °C e $+ 50$ °C.
- P.5 Le misurazioni della temperatura devono essere effettuate con un intervallo di 5 secondi.
- P.6 L'accuratezza nella misurazione della pressione all'interno dell'esperimento deve essere di ± 1 hPa.

2.1.3 Requisiti di design

- D.1 L'esperimento deve operare nel profilo di temperatura del volo BEXUS [12] [a pagina 171].
- D.2 L'esperimento deve operare nel profilo di pressione del volo BEXUS [12] [a pagina 171].
- D.4 La pompa deve funzionare per un periodo minimo di 60 minuti.
- D.5 Il volume minimo di aria raccolta nel contenitore deve essere di almeno 0,5 litri a livello del suolo.
- D.6 Il valore massimo del flusso d'aria attraverso i filtri deve essere al massimo di 0,10 L/min.
- D.8 I tubi tra valvole e filtri non devono presentare perdite.
- D.9 Le valvole devono essere chiuse all'atterraggio.
- D.10 Il sistema deve spegnere la pompa in caso di surriscaldamento.
- D.11 La precisione nella misurazione della temperatura deve essere ± 1 °C.
- D.12 La temperatura dell'aria che passa attraverso i filtri deve essere mantenuta tra $+ 10$ °C e $+ 25$ °C durante il campionamento.
- D.13 La temperatura della pompa deve essere mantenuta tra $+5$ °C e $+ 40$ °C.
- D.15 Il percorso del flusso deve essere scelto indipendentemente.
- D.17 La scatola dell'esperimento deve essere collocata con almeno una faccia esposta verso l'esterno.
- D.18 Il peso totale dell'esperimento deve essere inferiore a 14 kg.

2.1.4 Requisiti operativi

O.3 La selezione dei filtri deve cambiare a 4,5, 9, 13,5, 18, 22,5, 25 km e alla quota massima raggiunta dall'esperimento, con una precisione di ± 1 km.

O.4 L'apparecchiatura di campionamento per l'unità di raccolta deve essere immagazzinata ed equipaggiata in condizioni pulite per evitare la contaminazione del campione.

O.5 Il coperchio di ingresso deve essere rimosso prima del volo.

2.2 Sistema pneumatico

Per campionare analiti a diverse altitudini, è stato sviluppato un sistema pneumatico (Figure 2.1 e 2.2). I tubi scelti differiscono a seconda dell'uso che hanno. Dopo il primo test in camera a vuoto è emerso che non era necessario preriscaldare l'aria con un heater a lamina prima di entrare nella pompa N85.3 KPDCB (ovvero la pompa scelta per il design definitivo, in quanto la NMP850.1.2KPDC-B precedentemente montata non era in grado di garantire il valore corretto del flusso. Anche a bassa pressione la pompa era sovradimensionata). Per garantire il corretto intervallo di segnale di raccolta per la portata prevista, sono stati implementati due misuratori di portata con diversi intervalli di segnali di raccolta. L'aria è stata processata dalla pompa ed è entrata nel primo collettore con sette possibili percorsi di uscita. L'aria da qui poteva dunque andare:

- attraverso i filtri, raggiungendo il secondo collettore e poi il tubo di uscita che indirizzava il flusso d'aria all'esterno;
- nel canister (al termine della fase di raccolta dei filtri);
- attraverso un tubo di scarico (ad esempio fra un intervallo di campionamento ed il successivo per pulire il collettore dai residui di aria precedenti).

Una volta nel primo collettore, il percorso dell'aria è determinato dall'apertura e dalla chiusura delle elettrovalvole VDWQAM poste prima e dopo i filtri. Tutte le valvole sono state posizionate su una piastra di alluminio appositamente sagomata che è stata poi fissata alla piastra di base. Nel primo intervallo di altitudine (0-4,5 km) tutte le valvole sono state chiuse tranne quella che porta al filtro particolato e quella che permetteva al flusso d'aria di raggiungere il secondo collettore dopo aver attraversato i filtri. All'inizio della seconda fase (4,5-9 km), la

coppia di valvole che consentiva il campionamento del primo filtro è stata chiusa. Allo stesso tempo, la valvola di scarico è stata aperta per pulire il collettore; A questo punto, dopo l'opportuna pulizia, si è aperta la coppia di valvole corrispondenti al secondo filtro e la valvola di scarico è stata chiusa. Il terzo, il quarto e il quinto filtro hanno funzionato in modo simile. Una volta che i filtri hanno completato la loro raccolta, tutte le valvole relative al campionamento filtri si sono chiuse, sigillando efficacemente tutti i filtri, e la valvola che porta al canister è stata aperta per riempirlo. Il sistema di lavaggio è costituito da un tubo aggiuntivo collegato al primo collettore tramite la valvola FLUSH e direttamente al secondo collettore. Per riassumere, partendo dalla situazione in cui tutte le valvole sono chiuse, la sequenza di apertura è stata:

- [0 km]: Valvola FLUSH aperta (lavata l'aria residua che avrebbe potuto trovarsi nelle scatole di derivazione e nei tubi, assicurando che l'aria trattata non fosse contaminata);
- [0 – 4,5 km] Valvola di scarico chiusa, valvole 1a e 1b aperte;
- [4,5 km] Valvole 1a e 1b chiuse, valvola FLUSH aperta;
- [4,5 – 9 km] Valvola FLUSH chiusa, valvole 2a e 2b aperte;
- [9 km] Valvole 2a e 2b chiuse, valvola FLUSH aperta;
- [9 – 13.5 km] Valvola FLUSH chiusa, valvole 4a e 4b aperte;
- [18 km] Valvole 4a e 4b chiuse, valvola FLUSH aperta;
- [18 – 22,5 km, prima fase] Valvola FLUSH chiusa, valvole 5a e 5b aperte;
- [22,5 - 25 km, al termine della fase di campionamento dell'ultimo filtro] Valvole 5a e 5b chiuse, valvola CAN aperta.

Ogni volta che la valvola FLUSH si è aperta, l'aria all'interno del sistema veniva spinta via e la valvola veniva chiusa solo una volta che la gondola era completamente all'interno dell'intervallo di altitudine della tappa successiva. L'altitudine è stata determinata attraverso l'uso di un GPS, permettendo così alla PCU di innescare l'apertura e la chiusura delle valvole nella sequenza prestabilita. Poiché il flusso d'aria ottimale per consentire un corretto campionamento da parte dei filtri era predeterminato, la potenza della pompa è stata modulata grazie alla PCU per mantenere il flusso d'aria nell'intervallo desiderato. Una volta terminata la fase di raccolta del canister, la pompa è stata spenta, la valvola dedicata al canister è stata chiusa, sigillandolo e completando la fase di campionamento dell'esperimento. Tutti i componenti sono stati montati su una piastra di alluminio rivestita in punti specifici (ad esempio, sotto i collettori) con

gomma per l'assorbimento delle vibrazioni, mentre tutti i tubi sono stati fissati con morsetti adatti.

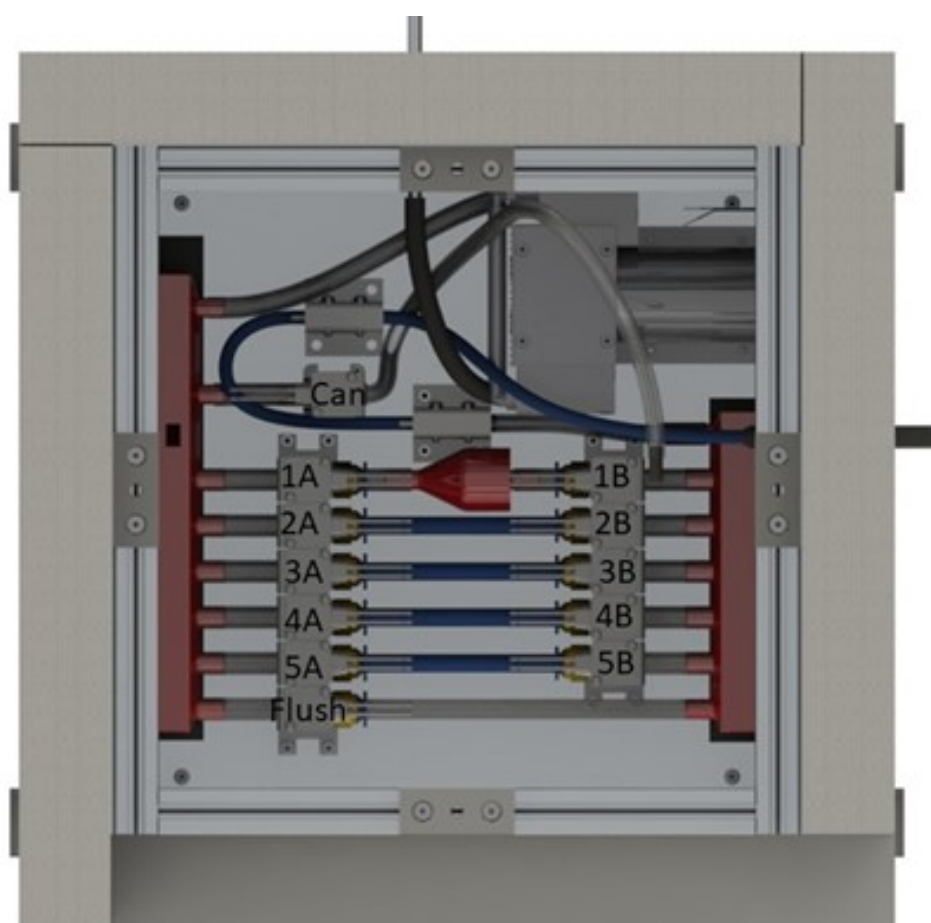


Figura 2.1: Sottosistema pneumatico CAD

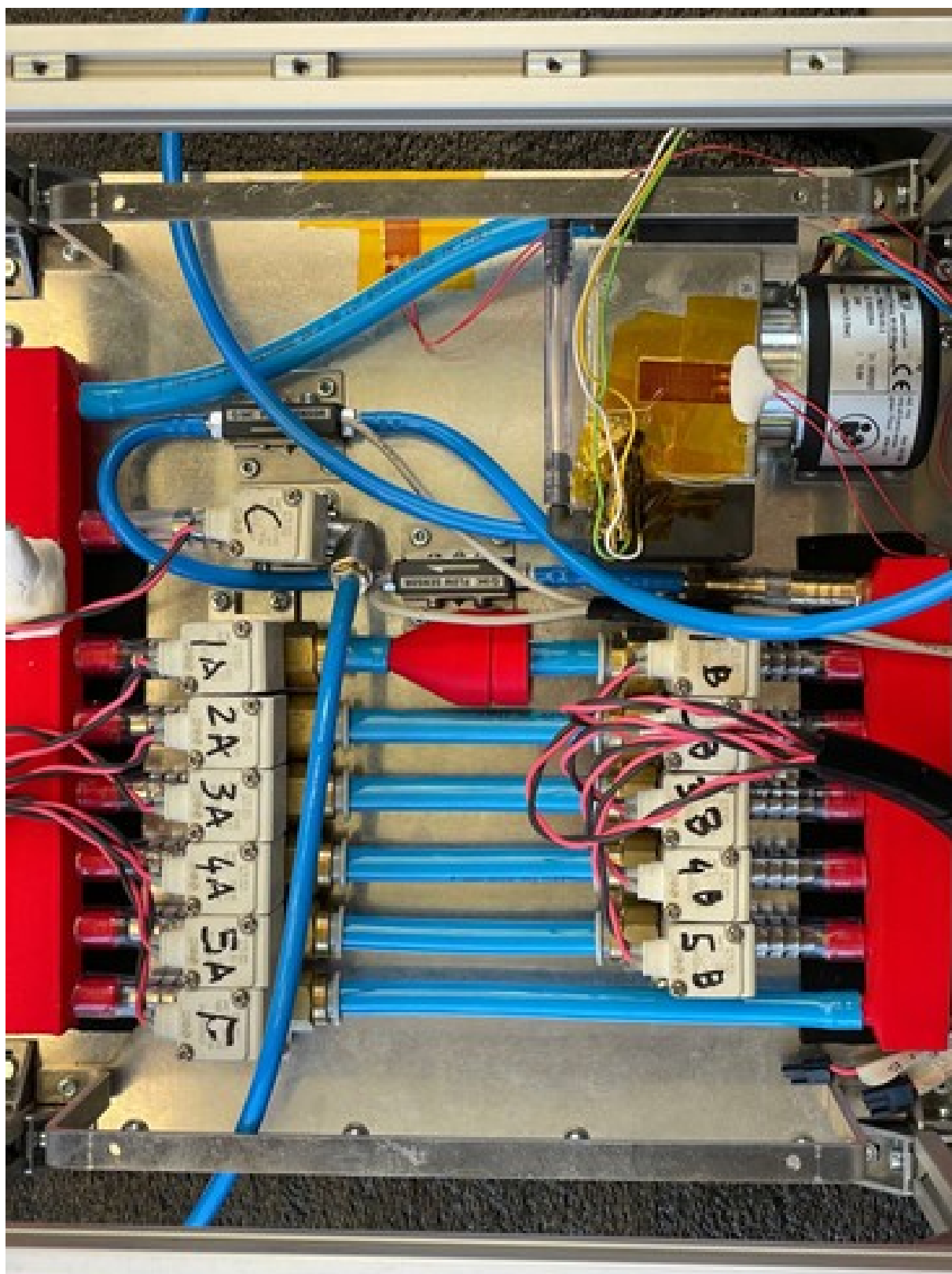


Figura 2.2: Sottosistema pneumatico reale

2.3 Componenti

ID	Component	Supplier	Manufactur Code	Quantity	Total Mass [Kg]	Total Cost (Euro)	Status
P1	Pump	KNF	N85.3 KPDCV	1	1.6	450	Assembled
P2	Rubber Pipes	ERREBI SNC			<0.2	33	Assembled
P3	Valves (VDW20QAMXB+2) flowmeters	SMC		21		62	Assembled
P4	Gaskets					31	Assembled
P5	Ronde extruded aluminium pipe 5x1	Aluveta				0	Assembled
P6	Teflon for threads and hydraulic joints	Supersamastore	TFL.10	1		11.7	Assembled
P7	Junction boxes	DII				0	Assembled
P8	Canister	Restek				0	Assembled
P9	Copper braid for Al tube			1			Not ordered**

Tabella 2.1: Tabella Componenti Pneumatici

2.3.1 Pompa

Il funzionamento del sistema pneumatico è garantito da una pompa a membrana. Questo tipo di pompa non consente la contaminazione tra gas e oli lubrificanti garantendo un flusso d'aria pulito. Il sistema contiene due misuratori di portata utilizzati per misurare con precisione la portata. La pompa ha quattro fili elettrici, quindi può essere controllata modificando i valori della potenza. La pompa inizialmente scelta è stata la NMP850.1.2KPDC-B (KNF®). I suoi dati sono stati riportati nella tabella 2.2 e la portata nominale a diverse pressioni è mostrata nella figura 2.3. Dopo il primo test di bassa pressione, ci siamo resi conto che il flusso che forniva era eccessivo e la pompa non poteva lavorare sotto i 100 mbar, infatti il suo limite è di 250 mbar. Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche nominali delle due pompe, oltre le loro dimensioni.

Flow rate at atm. Pressure (l/min)	8
Ultimate vacuum (mbar)	250
Max. operating pressure (bar rel)	2.3
Weight (g)	412
Voltage (V)	24
Motor	Brushless DC
Imax (A)	0.49
Diaphragm	EPDM
Valves	EPDM
Permissible media and ambient temperature (°C)	+5°C to +40°C

Tabella 2.2: Tabella Caratteristiche Tecniche Prima Pompa

Flow rate at atm. Pressure (l/min)	5
Ultimate vacuum (mbar)	25
Max. operating pressure (bar rel)	0.3
Weight (g)	1.6
Voltage (V)	24
Motor	Brushless 4 wires
I_{max} (A)	0.7
Diaphragm	EPDM
Valves	CR
Permissible media and ambient temperature (°C)	+5°C to +40°C

Tabella 2.3: Tabella Caratteristiche Tecniche Pompa Definitiva

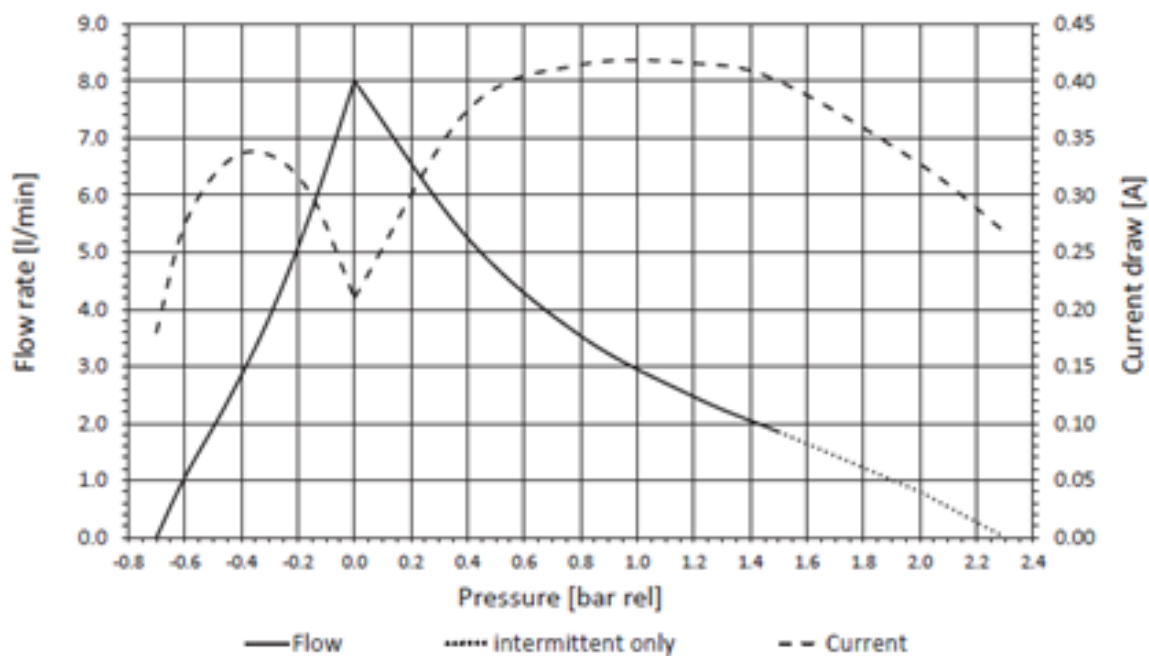


Figura 2.3: Performance prima pompa rispetto alla pressione

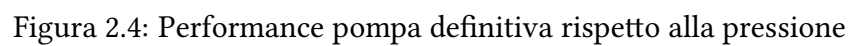


Figura 2.5: Dimensioni prima pompa

La gomma negli inserti della pompa è EPDM (Ethylene-Propylene Diene Monomer), un tipo di gomma sintetica che viene utilizzata in molte applicazioni. L'EPDM ha buone proprietà alle basse temperature, con proprietà elastiche a temperature fino a -40°C a seconda del grado

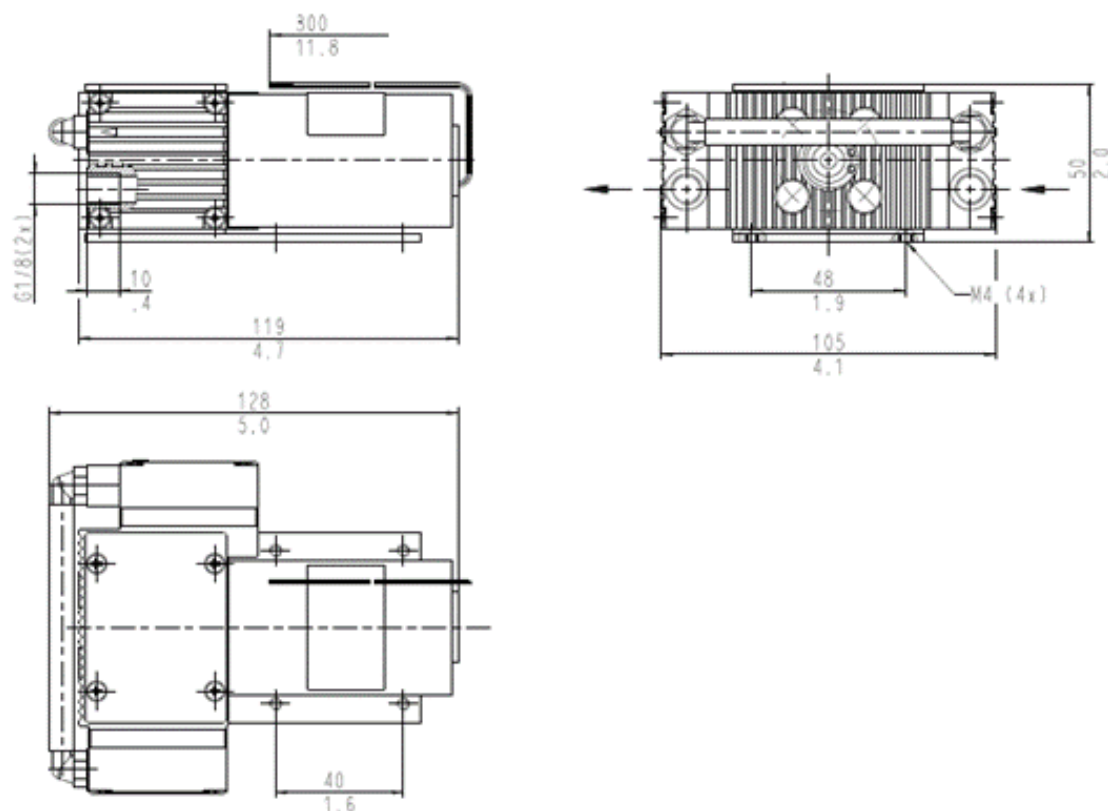


Figura 2.6: Dimensioni pompa definitiva

e della formulazione. In questa particolare pompa e miscela della gomma, la temperatura massima di servizio è 150°C mentre la minima è -50°C

L’NMP850.1.2KPDC-B è già stato utilizzato per altri esperimenti in precedenti voli BEXUS, come TUBULAR (BEXUS 26). È un modello molto compatto, ma non ha soddisfatto tutte le nostre esigenze. La portata della pompa è troppo superiore alla portata di progetto per garantire un campionamento ottimale, e per questo motivo è stata scelta una nuova pompa; grazie alla consulenza dei tecnici KNF si è deciso di adottare il modello N85.3 KPDCB, uscito nel 2021.

Nel secondo test pneumatico, tutti i requisiti sono stati soddisfatti. La pompa garantisce un’adeguata portata (Figura 2.4) durante le fasi di campionamento. Inoltre, anche a basse pressioni (e a temperatura ambiente) non è stato notato alcun surriscaldamento. Questo vale anche per la prova di termovuoto: la piastra in cui è fissata la pompa ha raggiunto una condizione di equilibrio termico. In questo modo, questa pompa è stata in grado di garantire il corretto flusso durante la fase di ascesa, mantenendo i valori di portata all’interno del range definito dalle esigenze. Non solo durante i test, ma anche durante la campagna di lancio sono stati soddisfatti anche i requisiti di flusso.

2.3.2 Elettrovalvole

La direzione del flusso d'aria è controllata da 12 elettrovalvole. Le elettrovalvole scelte sono il modello VDW20QAM prodotto da SMC (Figura 2.7). Queste valvole sono normalmente chiuse. Mentre le valvole sono chiuse, non richiedono alcun consumo energetico, ma mentre sono aperte, richiedono 3W ciascuna, in modo che il flusso d'aria possa passare attraverso i filtri o riempire il canister. Le elettrovalvole sono caratterizzate da consumi elevati mentre si aprono. Questo picco può essere pericoloso a causa dell'alto valore della corrente di picco che ne deriva. Per evitare un elevato valore di corrente di picco, che può essere superiore al valore limite, nel circuito di commutazione delle valvole sono presenti dei condensatori. Le valvole si trovano prima e dopo ogni filtro (in modo che i filtri possano essere sigillati una volta terminata la fase di raccolta) e prima del canister, in modo che il percorso che il flusso d'aria compie sia sempre univoco. L'attacco delle valvole è largo 1/8", compatibile con i tubi utilizzati, mentre il range di temperatura ambiente ammesso dalla bobina va da -10°C a 50°C, compatibile con la temperatura dell'esperimento. L'aria che passa attraverso i filtri, d'altra parte, deve rientrare nel range di campionamento, ma visto che durante i test la temperatura è sempre rimasta nel range adatto, non sono stati aggiunti riscaldatori aggiuntivi. Queste valvole sono oil-free e resistenti all'ozono. Le valvole della stessa serie sono state utilizzate nella precedente campagna BEXUS con risultati positivi. Tuttavia, sono stati effettuati diversi test per assicurarsi che le valvole sigillassero perfettamente i percorsi assegnati e che eseguissero perfettamente il loro compito.



Figura 2.7: Valvola VDW20QAP

Durante la fase di sviluppo, sono state apportate molte modifiche ai collegamenti delle valvole alla piastra di base. Le diverse possibilità sono state esaminate prima di avere le valvole

fisicamente; tuttavia, il 20 luglio 2020 sono arrivate le valvole, ed è stato deciso di riconsiderare la possibilità di utilizzare un binario per collegarle: avere fisicamente le valvole ha permesso di fare considerazioni migliori, e alla fine si è arrivati alla soluzione finale mostrata in figura 2.8. Come si può vedere è stata adottata una piastra di base spessa 1mm per collegare le valvole utilizzando viti M2 che vengono avvitate direttamente sui fori inferiori delle valvole; questa piastra è poi collegata alla piastra in alluminio spessa 2 mm grazie a 6 viti M3 e distanziali alti 4 mm. Questa soluzione ha permesso di:

- Ridurre i tempi di assemblaggio.
- Ridurre il peso.
- Facilitare la sostituzione di una valvola in caso di guasto.

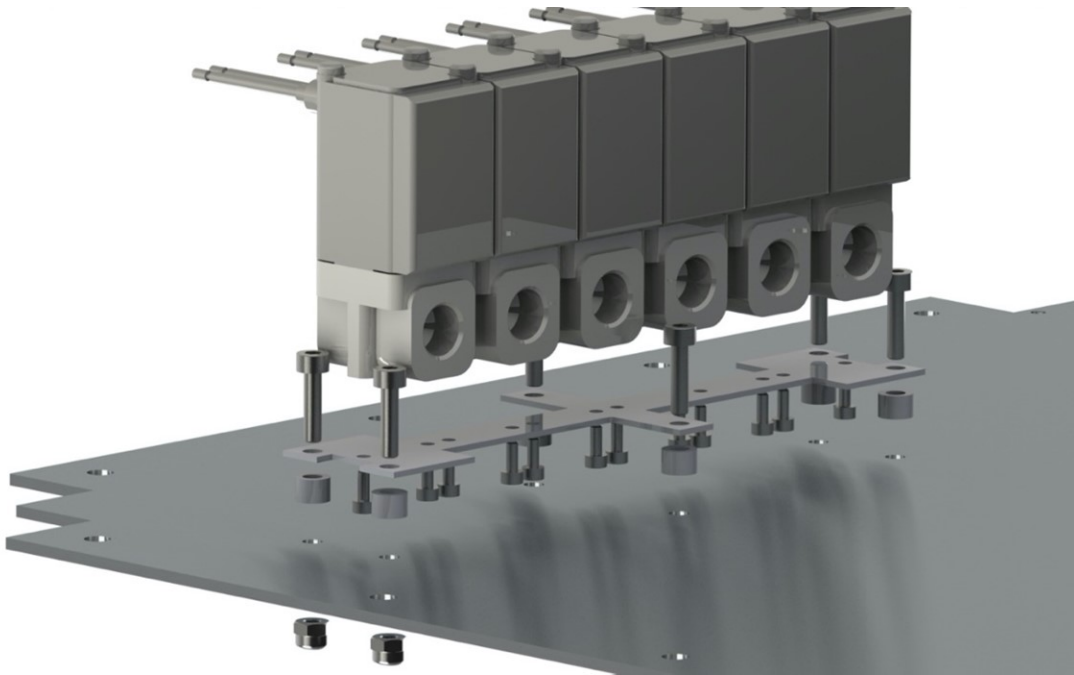


Figura 2.8: Valvole in configurazione definitiva

2.4 Regolazione del flusso

Grazie alla pompa a 4 fili, è stato possibile regolare il flusso senza l'ausilio di un regolatore meccanico che è stato invece considerato per il primo prototipo. L'uso di due diversi tipi di misuratori di portata potrebbe essere visto come un fattore di aumento dei rischi, poiché avere un componente aggiuntivo significa introdurre la possibilità di un suo eventuale guasto. In realtà, per ottenere dati di portata affidabili a varie altitudini, è stato necessario adottare due flussimetri con diversi range di portata:

- 0-3 l/min.
- 0-0,5 l/min.

Il misuratore tarato a 0-3 l/min è in grado di rilevare perfettamente la portata ai massimi valori della pompa, ma non è molto preciso quando si tratta di portate inferiori ad altitudini più elevate. Per questo motivo, il misuratore di portata 0-0,5 l/min è stato utilizzato per raccogliere informazioni più accurate sui valori di portata negli intervalli inferiori. Questo argomento è di fondamentale importanza poiché l'intervallo di portata dei filtri deve essere compreso tra 0,05-0,2 l / min per garantire la validità dei risultati.

2.5 Rischi

In questa sezione verranno esposti i rischi per il sistema pneumatico e termico o da essi derivanti; i rischi elencati di seguito sono quelli inseriti nel documento tecnico SED finale, che seguono una classificazione così definita:

- **Risk ID:**

- (a) TC – Rischio tecnico/di implementazione
- (b) MS – Missione (rischio di funzionalità durante la missione)
- (c) SF – Sicurezza
- (d) VE – Rischio per il veicolo (gondola)
- (e) PE – Rischio per il personale
- (f) EN – Rischio per l'ambiente
- (g) BG – Rischio per il budget
- (h) MG – Management

- **Probability (P):**

- (a) Minimum – Evento quasi impossibile
- (b) Low – Evento raro
- (c) Medium – Evento possibile
- (d) High – Evento probabile
- (e) Maximum – Evento sicuro, con possibilità che avvenga più volte

- **Severity (S):**

- (a) Negligible – Impatto minimo o trascurabile
- (b) Significant – Impatto che causa un funzionamento ridotto dell'esperimento
- (c) Major – Impatto che causa malfunzionamenti in sottosistemi interi o che causa perdita di dati
- (d) Critical – Impatto che causa il fallimento dell'esperimento o danni all'ambiente
- (e) Catastrophic – Impatto che conclude prematuramente il volo BEXUS e causa danni alla gondola o al personale tecnico

Ogni rischio (pneumatico, termico e non) è stato esaminato dal team ed una o più soluzioni sono state implementate per diminuire la probabilità di avvenimento o attutire gli impatti.

Registro rischi pneumatici e termici:

Codice	Rischio	Soluzione	Probabilità
TC60	La pompa si surriscalda e sono presenti difficoltà con spegnerla.	I sistemi di controllo termico attivo sono stati ampiamente testati/sensori ridondanti.	Bassa
TC90	Uno o più componenti critici vengono distrutti durante i test.	Sono stati ordinati componenti di ricambio e non abbiamo stressato troppo quelli più costosi.	Molto Bassa
TC100	Uno dei due misuratori di portata non funziona.	I misuratori di portata sono stati ampiamente testati per evitare che ciò accadesse.	Bassa
TC101	Quando la portata è bassa, i misuratori di portata non riescono a raccogliere i dati in modo sufficientemente accurato.	Abbiamo deciso di utilizzare misuratori di portata con range di campionamento diversi per evitare che ciò accadesse.	Bassa
TC110	Guasto della strumentazione di bordo a causa di pressione (troppo alta o troppo bassa).	Il sistema è stato testato in una camera a vuoto.	Bassa
MS20	Malfunzionamento della pompa.	La pompa è stata testata in una camera a bassa pressione. Abbiamo acquistato una nuova pompa per ridurre il rischio che ciò accada.	Bassa

MS21	Guasto della pompa a causa della bassa temperatura.	Oltre al riscaldamento causato dal funzionamento della pompa stessa, era presente un heater apposito per poter prevenire questo evento. Abbiamo anche acquistato una nuova pompa per ridurre il rischio.	Bassa
MS40	Campionamento compromesso dalla quantità errata di aria in entrata.	La pompa era regolata dalla porta "PWM" dell'Arduino. Sulla base dei dati generati dal flussimetro abbiamo variato il numero di rotazioni della pompa e quindi la portata.	Bassa
MS50	La temperatura dell'aria non rientra nell'intervallo richiesto per il campionamento.	E' stato effettuato un adeguato controllo termico, testato inoltre in laboratorio.	Bassa
MS60	Il contenitore potrebbe rompersi a causa di un gradiente di pressione.	Il contenitore è stato riempito con solo l'80% del volume totale ed è stato ampiamente testato.	Bassa
MS91	Il contenitore potrebbe riempirsi con l'aria nei tubi all'inizio del lancio invece dell'aria ad alta quota.	Abbiamo progettato un sistema costituito da un giunto a T e una valvola di non ritorno per evitare che ciò accada.	Bassa
MS92	La valvola di non ritorno non si apre quando dovrebbe.	Abbiamo testato questa soluzione per evitare che ciò accadesse.	Bassa
MS100	Tubi di aspirazione bloccati da un elemento esterno.	Un tappo ha chiuso l'aspirazione dei tubi prima del decollo e dopo l'atterraggio.	Bassa

MS110	Contaminazione dei filtri dopo il lancio.	Le valvole sono state posizionate prima e dopo ogni filtro e sono state testate per proteggere sia dall'aria che dall'acqua. La procedura di estrazione è stata testata con successo.	Bassa
MS120	Il sistema di campionamento può essere contaminato prima del volo.	Filtri e contenitori durante la fase di assemblaggio sono stati gestiti accuratamente seguendo una sequenza prestabilita di azioni ed accortezze.	Bassa
VE50	Il canister è danneggiato da elevate accelerazioni dovute agli impatti di atterraggio.	E' stato costruito un compartimento personale per il contenitore.	Bassa

Tabella 2.4: Tabella dei rischi

2.6 Test eseguiti

Di seguito sono riportati i test eseguiti per validare la parte pneumatica dell'esperimento e l'esito ottenuto da essi. Le seguenti tabelle con relative procedure sono state estrapolate dal documento tecnico SED.

2.6.1 Pompa in camera vuoto

Test Number	1
Test Type	Vacuum
Test facility	University of Padova, Padova
Tested item	Pump
Model	Flight Model

Procedure, test level and duration	Test procedure: It will test the pump: • The pump will be connected to the pwm port of the Arduino to check the airflow as the outside air pressure changes by measuring it using the flowmeter. • The pump temperature will be monitored by a temperature sensor. • The pump will be switched on and off during the decreasing of the pressure. • The pump will work for at least 30 minutes. Test duration: 1 hour
Test campaign duration	1 day
Test campaign date	3 August 2021
Test Completed	YES
Requirements Verified	YES

Tabella 2.5: Procedura test 1

La pompa ha funzionato correttamente anche a pressioni molto basse (15 mbar) senza interruzioni. L'accensione e lo spegnimento a basse pressioni non sono state un problema.

2.6.2 Sistema pneumatico

Test Number	2
Test Type	Vacuum
Test facility	University of Padova, Padova
Tested item	Pneumatic system
Model	Flight Model

Procedure, test level and duration	Test procedure: It will test the entire pneumatic system: • The pump will be connected to the PWM port of the Arduino to check how the airflow will be adjusted as the outside air pressure changes by measuring it using the flowmeter. • Ensure there are no leaks in the valves. • Verify that valves and sensors perform by making an opening and closing test. • Control the airflow through the filter system. • Control the inflation of the canister (at the beginning the canister shall be empty). • Test of the pneumatic system assembling procedure. • Control there are no leaks in the entire pneumatic system using one canister as a verification tool. Test duration: 1 hour
Test campaign duration	2 days
Test campaign date	3/4 August 2021
Test Completed	YES
Requirements Verified	YES

Tabella 2.6: Procedura test 2

Il sistema pneumatico non ha presentato problemi a pressione ambiente, mentre a basse pressioni sono stati osservati problemi relativi al gonfiaggio del contenitore. Questo, infatti, si gonfiava e si sgonfiava da solo (senza alcun input) al variare della pressione. Il montaggio e lo smontaggio dei filtri sono stati eseguiti con successo. La presenza di perdite è stata controllata gonfiando il contenitore e, lasciando la valvola aperta, premendo sul contenitore per forzare l'aria nel sistema e chiudendo il tubo di uscita. Non sono state trovate perdite.

2.6.3 Bassa pressione

Test Number	3
Test Type	Vacuum
Test facility	University of Padova, Padova
Tested item	Pneumatic system, electronic system, insulating foam
Model	Flight Model
Procedure, test level and duration	Test procedure: • Place all systems in the vacuum chamber, the pressure will be taken down from 1200 hPa to a 5hPa in steps. • Ensure that all the electronic system perform as intended. Check how much power is dissipated by the pump, valves and Arduino using an infrared thermometer. • Check the insulating foam to ensure it does not deform when exposed to low pressure and that there is no outgassing. Test duration: 2 hours.
Test campaign duration	1 day
Test campaign date	3/4 August 2021
Test Completed	YES
Requirements Verified	YES

Tabella 2.7: Procedura test 3

L'impianto elettrico ha funzionato senza problemi a basse pressioni (15 mbar). La dissipazione di potenza dei componenti è stata verificata misurando la temperatura dei componenti con un termometro a infrarossi. È stato osservato che l'inerzia termica della pompa è molto buona in quanto ha rilasciato il calore in eccesso sulla piastra non toccando mai il range massimo di temperatura (50°C).

2.6.4 Tenuta del canister

Test Number	6
Test Type	Pneumatic
Test facility	University of Padova, Padova
Tested item	Canister sampling system
Model	Flight Model

Procedure, test level and duration	Test procedure: • Connect the canister to the pneumatic system. • Check the canister filling time as the flow rate changes. • Fill the canister to the maximum and wait 3 minutes before turning off the pump, then check that the canister is not damaged. • Using a bike pump, fill the canister until it explodes and then check the failure points and failure pressure of the structure. Test duration: 30 minutes.
Test campaign duration	1 hour
Test campaign date	July 2020
Test Completed	YES
Requirements Verified	YES

Tabella 2.8: Procedura test 4

A pressione ambiente il contenitore si è gonfiato correttamente. Inoltre, è stato possibile osservare che il contenitore riempito l'anno scorso è rimasto gonfiato per un anno intero senza variazioni visibili di volume. Il test di scoppio del contenitore ha mostrato che i punti in cui il contenitore potrebbe fallire si trovano lungo i bordi del contenitore.

2.6.5 Dimensioni

Test Number	19
Test Type	Verification
Test facility	DII Laboratory
Tested item	The whole experiment
Model	Flight Model
Procedure, test level and duration	Test procedure: Measure the external dimension of the experiment. Test duration: 30 minutes.
Test campaign duration	1 hour
Test campaign date	August 2021
Test Completed	YES

Requirements Verified	YES
------------------------------	-----

Tabella 2.9: Procedura test 5

2.6.6 Peso

Test Number	18
Test Type	Weight Verification
Test facility	DII Laboratory
Tested item	The whole experiment
Model	Flight Model
Procedure, test level and duration	Test procedure: Weight the experiment with a balance. Test duration: 5 minutes.
Test campaign duration	10 minutes
Test campaign date	August 2021
Test Completed	YES
Requirements Verified	YES

Tabella 2.10: Procedura test 6

2.7 Problematiche

I problemi principali sorti durante la fase di integrazione sono stati due: il corretto riempimento del canister e la regolazione della pompa. Per quanto riguarda il primo, durante la prova nella camera a vuoto, in cui è stato validato il funzionamento dei vari sottosistemi, si è verificato un problema relativo al riempimento del contenitore: questo era già gonfio ben prima di raggiungere l'altezza di campionamento desiderata (fase stazionaria) e alla fine della prova, quando la pressione è tornata uguale a quella dell'ambiente, il contenitore si è sgonfiato. Questo problema è dovuto all'aria intrappolata tra la valvola e il contenitore che, essendo a pressione ambiente, si espande una volta raggiunte le basse pressioni causando il riempimento indesiderato del contenitore e non permettendo un corretto campionamento alla quota desiderata. Per risolvere questo problema è stato implementato un giunto a tre vie immediatamente prima della valvola del contenitore (Figure 2.9 e 2.10), con l'aggiunta di una valvola di non

ritorno situata nella terza via del giunto. Poco prima del lancio dell'esperimento, il tubo di ingresso è stato temporaneamente collegato alla valvola di non ritorno e la pompa è stata avviata; l'azione della pompa ha creato una caduta di pressione tra i due lati delle valvole che si apriranno permettendo all'aria intrappolata all'interno del tubo di uscire da esso. Dopo che questa procedura è stata conclusa, il tubo di ingresso è stato ricollegato alla pompa e la valvola di non ritorno è rimasta chiusa per tutto il periodo di lancio, durante il quale il contenitore non è stato più influenzato dal problema del gonfiaggio poiché l'aria non residua era contenuta nel tubo dalla valvola al contenitore. E' stato possibile inoltre installare la valvola di non ritorno subito prima della valvola del contenitore, poiché si apre solo quando viene raggiunta la differenza di pressione di 1bar e dunque sarebbe rimasta chiusa per tutta la durata del volo dell'esperimento a causa dell'impossibilità di raggiungere la differenza di pressione, visto che quella esterna è troppo bassa. Sotto due immagini del circuito pneumatico posto prima del contenitore.

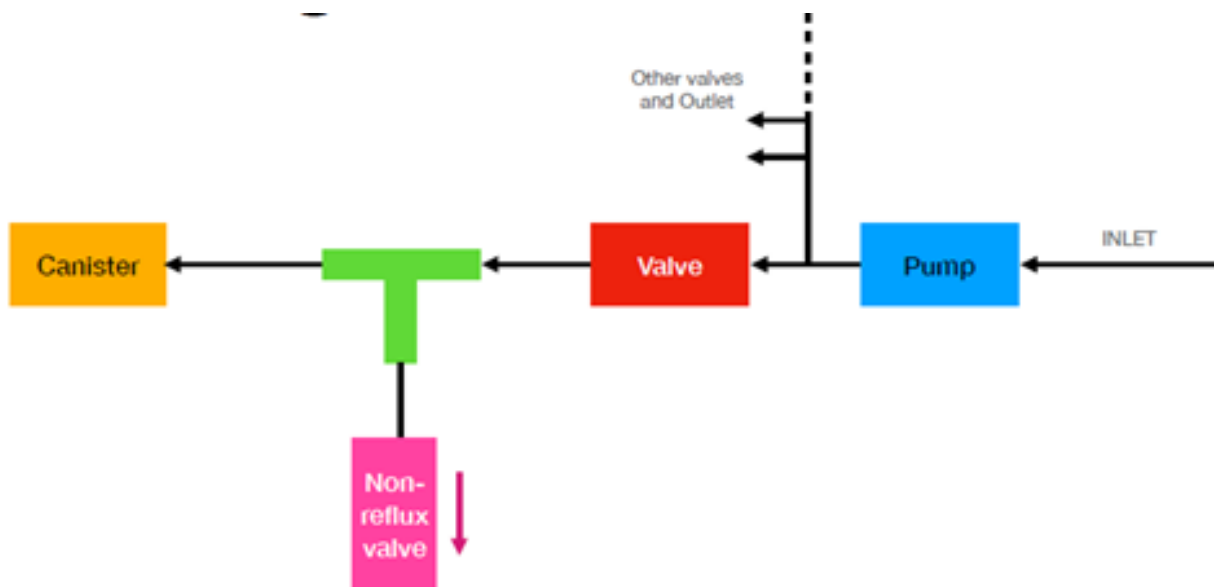


Figura 2.9: Circuito a 3 vie del canale pre-canister

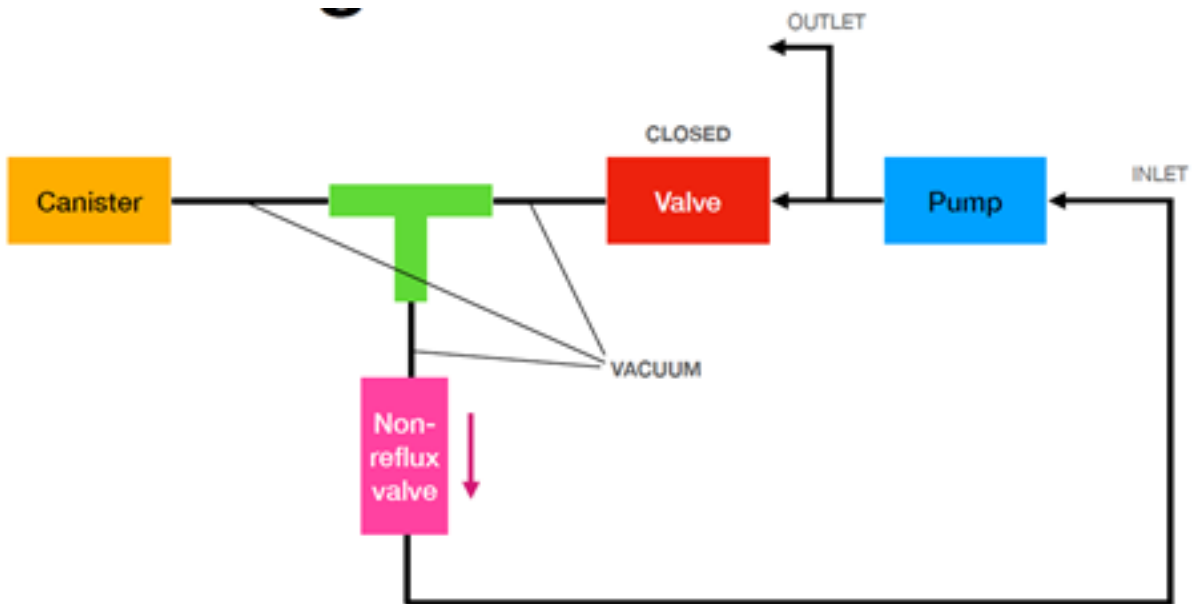


Figura 2.10: Circuito in fase di svuotamento del tubo

Per il secondo problema è necessario evidenziare come la prima pompa KNF scelta, a causa della sua configurazione elettronica, non consentisse un'agevole modulazione in PWM, il che ha causato non pochi problemi in fase di programmazione. Con il 2021, un nuovo modello di pompa è stato rilasciato, e attraverso anche una consulenza con i tecnici del fornitore della pompa, è stato definito l'acquisto del nuovo modello mostrato nelle sezioni precedenti. Tale modello, oltre che ad un range di pressioni possibili più ampio, forniva anche un'interfaccia elettronica più versatile e più facilmente controllabile.

Capitolo 3

Design Sottosistema Termico

3.1 Requisiti

L'obiettivo principale del design termico era quello di garantire la temperatura desiderata dei componenti all'interno dell'esperimento durante il volo sul pallone BEXUS. Circa 15 gradi Celsius sarebbe la temperatura ambiente ideale per mantenere ogni componente funzionante, con particolare attenzione data ai filtri, il cuore dell'esperimento e anche i componenti con il range di temperatura di esercizio più severo. Le difficili condizioni ambientali incontrate nella stratosfera sono state mitigate per mantenere i componenti ad una temperatura di lavoro sicura. Il design termico include soluzioni attive e passive per proteggere l'esperimento dalle dure condizioni di lavoro. La scatola, realizzata con pareti in Al6082 T6 spesse mezzo millimetro, è stata isolata da uno strato in polistirene estruso (40 mm). L'approccio ha preso in considerazione i possibili flussi di calore che potrebbero aver influenzato l'esperimento (conduzione e irraggiamento, poiché la convezione cessa di essere rilevante ad alta quota) per analizzare lo stato termico dell'esperimento a diverse altitudini. Un bilancio termico è stato utilizzato per ottenere i valori dei valori di temperatura dei componenti interni del dispositivo, in modo che il team sapesse quando i riscaldatori dovevano essere accesi e spenti o se la loro potenza doveva essere aumentata. Inoltre, sono stati impiegati riscaldatori per alcuni componenti critici come le pompe e i filtri, che hanno intervalli di temperatura ben definiti per funzionare correttamente. Poiché alcuni componenti rischiavano il surriscaldamento, è stata adottata una contromisura in forma di dissipatori di calore. I filtri sono stati isolati con polistirolo per fornire un'ulteriore protezione contro l'atterraggio duro e per garantire che la loro temperatura non scendesse a valori critici dopo l'atterraggio: se durante il volo era obbligatorio che la loro temperatura rimanesse nell'intervallo 10-25 °C, è stato preferibile avere temperature molto più

fredde (circa 0-4°C) dopo la fase di raccolta. Questo perché un afflusso di calore avrebbe favorito il desorbimento dei filtri. Di seguito i requisiti relativi alla parte termica: P.4 L'intervallo di temperatura misurata deve essere compreso tra -10 °C e + 50 °C.

P.5 Le misurazioni della temperatura devono essere effettuate con un intervallo di 5 secondi.

D.1 L'esperimento deve operare nel profilo di temperatura del volo BEXUS [a pagina 171].

D.11 La precisione nella misurazione della temperatura deve essere di ± 1 °C.

D.12 La temperatura dell'aria che passa attraverso i filtri deve essere mantenuta tra + 10 °C e + 25 °C durante il campionamento.

D.13 La temperatura della pompa deve essere mantenuta tra +5 °C e + 40 °C.

3.2 Range operativi dei componenti

Gli intervalli di temperatura operativa dei componenti dell'esperimento sono stati stabiliti individualmente per ciascuno dei gruppi specificati. I dati sono presentati nella tabella seguente.

Strumento	Temperatura Operativa (°C)
Pompa N85.3 KPDCB	+5/+40
Valvola VDW20QAP	-10/+50 (ambiente) +1/+50 (evitare il congelamento dei liquidi)
Arduino Due	-40/80
Arduino Ethernet Shield 2	-20/70
Convertitore DCDC LM2596	-45/85
Breadboard	0/45
PFMV505 (flussometro)	-10/60
Connettore circolare	-55/125
Filtri per tubi di desorbimento termico in vetro	10/25
Whatman QM-A Filtri al quarzo	Fino a 500°C
Gomma SBR (elastometrica)	-20/70
Contenitore Max 82 GPS	-40/+85
Sensore di pressione	-40/+85
Sensore di temperatura DS1631	-55/125

Tabella 3.1: Requisiti termici Componente Intervallo di temperatura operativa (°C)

Si può notare dagli intervalli di temperatura dei componenti che alcuni di questi hanno intervalli rigorosi. Pertanto, si è rivelato necessario far fronte alle loro esigenze applicando alcuni riscaldatori ad entrambi i componenti a rischio di raffreddamento eccessivo, per mantenere un'adeguata temperatura interna ed un corretto campionamento. Lo spessore dell'isolante del guscio esterno ha attutito in maniera importante il flusso di calore in uscita, in modo che la massima potenza dei riscaldatori non fosse necessaria a meno che la scatola non subisse cadute di temperatura impreviste. Nel caso in cui tali cadute fossero avvenute, un sensore di temperatura interno avrebbe emesso il comando di aumento di potenza dei riscaldatori.

3.3 Documentazione su Kiruna

3.3.1 Temperatura di rugiada e possibile condensazione nei tubi

Per determinare la temperatura prevista del punto di rugiada al momento del lancio ad ottobre, sono stati utilizzati dati statistici basati sugli anni passati. È stato registrato che l'umidità relativa nel mese di ottobre a Kiruna è di circa il 90% con temperature nell'intervallo $[-8; 5]$ °C. Da questi valori è possibile ottenere una stima approssimativa della temperatura del punto di rugiada da un grafico o da una tabella (Figure 3.1 e 3.2). Va notato che questo tipo di stima è possibile data la progressione quasi lineare della temperatura del punto di rugiada nel grafico. Dopo aver esaminato il grafico, si può affermare con un certo grado di sicurezza che la temperatura del punto di rugiada si aggira intorno a 0 °C.

Abbiamo considerato diversi tubi per il sistema pneumatico: un tubo di ingresso in alluminio, tubi in gomma e tubi alimentari in plastica, oltre a un tubo in nylon. Abbiamo quindi calcolato come affrontare le diverse tipologie in esame, anche nel caso di utilizzo del tubo di alluminio come ingresso dell'aria. Questo tubo sarebbe dovuto esser preriscaldato a circa 25 °C e costantemente riscaldato durante l'esperimento per garantire che il flusso d'aria soddisfacesse i suoi requisiti di temperatura, garantendo quindi che la temperatura del tubo fosse sempre molto più alta della temperatura del punto di rugiada e il fenomeno della condensazione non accadesse. Gli altri tubi non sono stati riscaldati direttamente dai riscaldatori e non si sono mai avvicinati alla temperatura del punto di rugiada poiché sono schermati dal controllo termico passivo esterno e riscaldati da altri componenti nell'esperimento. Poiché il monitoraggio della temperatura del flusso d'aria avviene nel primo collettore, l'Arduino ha dovuto tener conto dei cali di temperatura inaspettati aumentando la potenza dei riscaldatori applicati al tubo di

Air Temp. °C	Dew point in °C at a relative humidity of:									
	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	
5	-4.1	-2.9	-1.8	-0.9	0.0	0.9	1.8	2.7	3.6	
6	-3.2	-2.1	-1.0	-0.1	0.9	1.8	2.8	3.7	4.5	
7	-2.4	-1.3	-0.2	0.8	1.8	2.8	3.7	4.6	5.5	
8	-1.6	-0.4	0.8	1.8	2.8	3.8	4.7	5.6	6.5	
9	-0.8	0.4	1.7	2.7	3.8	4.7	5.7	6.6	7.5	
10	0.1	1.3	2.6	3.7	4.7	5.7	6.7	7.6	8.4	
11	1.0	2.3	3.5	4.6	5.6	6.7	7.6	8.6	9.4	
12	1.9	3.2	4.5	5.6	6.6	7.7	8.6	9.6	10.4	
13	2.8	4.2	5.4	6.6	7.6	8.6	9.6	10.6	11.4	
14	3.7	5.1	6.4	7.5	8.6	9.6	10.6	11.5	12.4	
15	4.7	6.1	7.3	8.5	9.5	10.6	11.5	12.5	13.4	
16	5.6	7.0	8.3	9.5	10.5	11.6	12.5	13.5	14.4	
17	6.5	7.9	9.2	10.4	11.5	12.5	13.5	14.5	15.3	
18	7.4	8.8	10.2	11.4	12.4	13.5	14.5	15.4	16.3	
19	8.3	9.7	11.1	12.3	13.4	14.5	15.5	16.4	17.3	
20	9.3	10.7	12.0	13.3	14.4	15.4	16.4	17.4	18.3	
21	10.2	11.6	12.9	14.2	15.3	16.4	17.4	18.4	19.3	
22	11.1	12.5	13.8	15.2	16.3	17.4	18.4	19.4	20.3	
23	12.0	13.5	14.8	16.1	17.2	18.4	19.4	20.3	21.3	
24	12.9	14.4	15.7	17.0	18.2	19.3	20.3	21.3	22.3	
25	13.8	15.3	16.7	17.9	19.1	20.3	21.3	22.3	23.2	
26	14.8	16.2	17.6	18.8	20.1	21.2	22.3	23.2	24.2	
27	15.7	17.2	18.6	19.8	21.1	22.2	23.2	24.3	25.2	
28	16.6	18.1	19.5	20.8	22.0	23.2	24.2	25.2	26.2	
29	17.5	19.1	20.5	21.7	22.9	24.1	25.2	26.2	27.2	
30	18.4	20.0	21.4	22.7	23.9	25.1	26.2	27.2	28.2	

Figura 3.1: Punto di rugiada a diversa umidità relativa

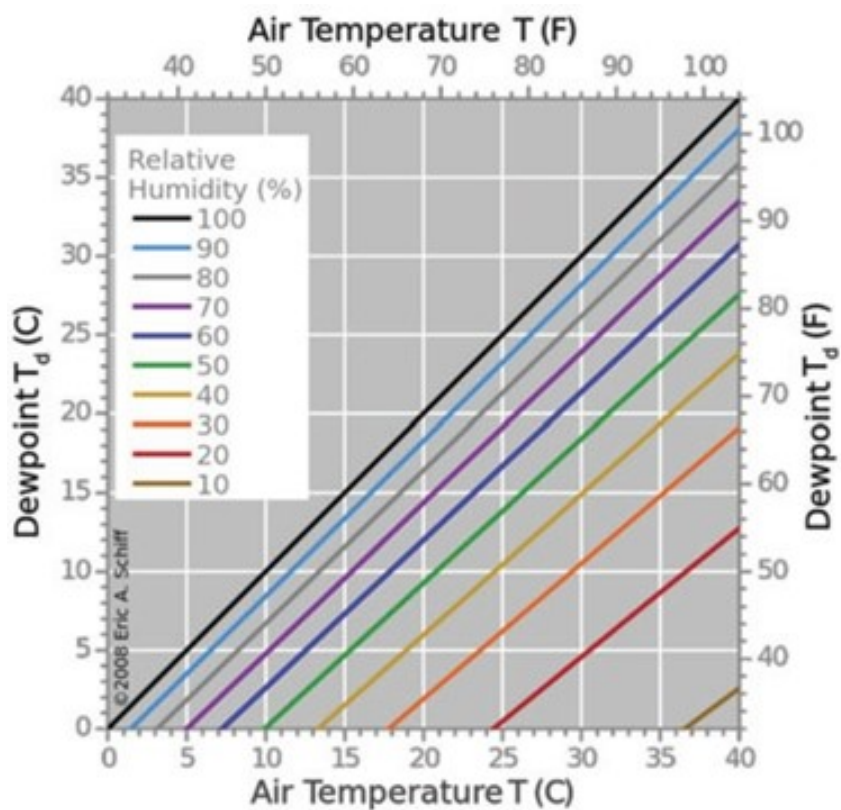


Figura 3.2: Curve del punto di rugiada

alluminio. In questo modo, la temperatura superficiale dei tubi è sempre stata mantenuta ben al di sopra della temperatura del punto di rugiada.

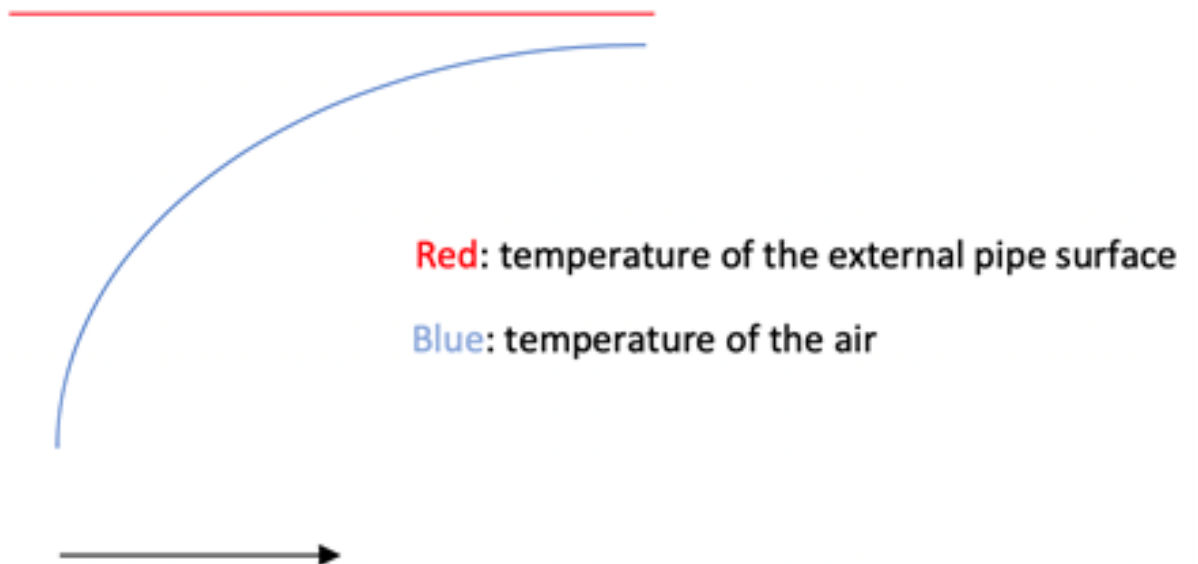


Figura 3.3: Profilo di temperatura della superficie esterna del tubo in alluminio

3.4 Framework dei calcoli

L'analisi termica è stata condotta considerando l'impatto di ciascun flusso di calore che potrebbe influenzare l'esperimento. L'equazione del bilancio energetico che è stata applicata all'intero esperimento include questi flussi:

- Flusso di conduzione;
- Flusso di irraggiamento terrestre;
- Flusso di irraggiamento dell'esperimento;
- Flusso di Albedo;
- Flusso solare;
- Energia interna dissipata;
- Flusso interno del riscaldatore (regolabile).

Per l'analisi sono stati scelti due casi: il peggior caso caldo e il peggior caso freddo, simili alle due condizioni più difficili che l'esperimento può incontrare. Sulla base di una revisione dei profili termici dei precedenti voli BEXUS, è stato riscontrato che il caso freddo corrisponde allo stato ottenuto subito dopo aver lasciato la troposfera, dove la temperatura esterna era di circa -60°C (lancio di giorno). La situazione più gravosa avverrebbe durante la salita del pallone, ad un'altezza abbastanza alta da essere completamente influenzata dai flussi di albedo e sole (circa -25°C).

I calcoli per stabilire quanto dovrebbero essere spessi i pannelli isolanti sono stati condotti assumendo un'area esposta di $0,897 \text{ m}^2$. Il materiale isolante è il polistirene, che ha una conducibilità termica di $\lambda_{ps} = 0,030 - 0,034 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Il flusso di calore interno, generato dalla potenza dissipata dei componenti, è stimato in prima approssimazione intorno a $q_{diss} = 11,8 \text{ W}$. La temperatura esterna dovrebbe essere nel peggiore dei casi intorno a -60°C all'esterno della cabina, mentre la temperatura interna ideale della scatola è di circa 15°C per preservare i componenti critici. Con queste informazioni in mente, è possibile calcolare un valore approssimativo dello spessore necessario dei pannelli isolanti. Supponendo che il calore interno sia uguale alla potenza interna dissipata, $H = q_{diss}$, abbiamo:

$$q_{diss} = \lambda_{ps} A (t_i - t_o) / L$$

$$L_{ps} = \lambda_{ps} A (t_i - t_o) / q_{diss} = 0,034 * 0,897 * (15 - (-60)) / 10 = 0,229 \text{ m}$$

Il valore ottenuto non tiene conto di tutti gli altri flussi di calore, quindi è stato ridotto come primo tentativo (poi confermato) a 40 mm. Tenendo conto anche di tutti gli altri pannelli, il nuovo flusso di calore atteso necessario per garantire la corretta temperatura interna è:

$$H = \frac{(t_i - t_o)}{(s_{PS} / (A_{PS} \lambda_{PS}) + s_{AL} / (A_{AL} \lambda_{AL}))}$$

Il pannello in alluminio ha uno spessore di 0,5 mm e una conducibilità termica di circa $210 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$.

$$H = \frac{15 - (t_o)}{0,04 / (0,897 * 0,034) + 0,0005 / (0,897 * 210)}$$

Potenza dissipata interna stimata intorno a 11,8 W.

Flusso di calore solare

$$A_{sun} = 2 * 0,389 * 0,382 + 0,389 * 0,389 = 0,448 \text{ m}^2$$

$$JS = 500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \alpha_{est} = 0,01$$

$$A_{eff} = A_{sun} \cos 45 = \text{Area proiettata nella direzione del Sole}$$

$$q_{sun} = A_{sun} \cos 45 JS \alpha_{est} = 1,58 \text{ W}$$

Flusso di calore planetario

$$A_p = 2 * 0,389 * 0,382 = 0,297 \text{ m}^2$$

$A_{effp} = A_p * 0,3 = \text{Area proiettata in direzione della Terra}$

$F_{s-p} = \text{fattore di vista} = 0.3$

$T_e = 288K$

$q_p = A_p F_{s-p} \alpha_{est} \sigma_n T_e^4 = 0.34W$

Flusso di calore Albedo

$A_a = 2 * 0,389 * 0,382 = 0,297m^2$

$F_a = \text{fattore di vista} = 0.3$

$a = 0.34$

$q_a = A_a F_a A J_{s\alpha est} = 0,151W$

Irraggiamento emesso dal dispositivo

$q_b = -A \epsilon_b \sigma_n T_b^4$

La somma di tutti i flussi di calore dichiarati copre approssimativamente la potenza prevista necessaria per mantenere la temperatura interna a 15°C, Ma alcuni problemi di raffreddamento possono sorgere se il tempo è nuvoloso: in quel caso è previsto un calo di calore, quindi sarebbe consigliabile compensare questo calo con il controllo termico attivo.

3.4.1 Worst Hot Case

Il Worst Hot Case previsto corrisponde a 11 km di altezza in uno scenario in cui non ci sono nuvole, l'esperimento risulterebbe essere completamente esposto al Sole e quindi sarebbero coinvolti tutti i possibili flussi di calore:

- Albedo;
- Flusso di calore del sole;
- Flusso di calore terrestre;
- Potenza dissipata interna.

I calcoli preliminari hanno mostrato un caso in cui la scatola deve rilasciare un flusso di calore di circa 10,5 W collegando i componenti di surriscaldamento (pompa) alla struttura della gondola con una treccia di rame. Le valvole hanno bisogno di 3W quando vengono attivate. L'elevata potenza dissipata avrebbe potuto creare surriscaldamento soprattutto se fossero stati aperti per lungo tempo. Gli hotspot possono danneggiare i componenti vicini e influenzare il campionamento dei filtri chimici. Per una buona stima della potenza dissipata, secondo i dati sperimentali e precedenti BEXUS, è stato necessario mettere quasi tutta la potenza elettrica

come termica, come è stato calcolato in Appendice E del documento SED. Con un test, la temperatura è stata monitorata per verificare la validità di queste ipotesi. Anche i connettori sulla PCB sono stati collegati ai profili BOSCH con una treccia di rame, poiché tendevano a raggiungere una temperatura considerevolmente elevata.

$$q_a + q_{earth} + q_{sun} + \frac{T_i - T_{out}}{R_c} = \sigma \epsilon A T_{out}^4$$

$$1.58 + 0.34 + 0.4 + \frac{288.15 - T_{out}}{1.31} = 5.76 * 10^{-8} * 0.01 * 0.8977 T_{out}^4$$

$$T_{out} = 286.38K$$

$$q_{diss} - \frac{T_i - T_{out}}{R_c} = q_r$$

$$11.8 - \frac{288.15 - 286.38}{1.31} = q_r$$

$$q_r = 10.45W$$

q_r è il flusso di calore che deve essere rilasciato dall'esperimento per mantenere 15°C all'interno.

3.4.2 Worst Cold Case

Il Worst Cold Case previsto corrisponde ad uno scenario in cui il tempo è nuvoloso e l'esperimento non è stato investito dal flusso di calore del Sole, rimuovendo così dall'equazione di equilibrio i flussi di calore di albedo e del Sole. La variazione di temperatura è influenzata da:

- Potenza dissipata interna;
- Flusso di calore terrestre.

Dopo alcuni calcoli preliminari (Appendice E del documento SED), per mantenere la temperatura della scatola al valore desiderato di 15°C, è risultato che fosse necessario un flusso di calore di circa 8,81 W da rilasciare.

$$q_{earth} + \frac{T_i - T_{out}}{R_c} = \sigma \epsilon A T_{out}^4$$

$$0.34 + \frac{288.15 - T_{out}}{1.31} = 5.67 * 10^{-8} * 0.01 * 0.8977 T_{out}^4$$

$$T_{out} = 284.24K$$

$$q_{diss} - \frac{T_i - T_{out}}{R_c} = q_r$$

$$11.8 - \frac{288.15 - 284.24}{1.31} = q_r$$

$$q_r = 8.81W$$

q_r è il flusso di calore che deve essere rilasciato dall'esperimento per mantenere 15 ° C all'interno.

3.5 Soluzione Passive

3.5.1 Pannelli

La barriera termica dell'esperimento è costituita da uno strato in polistirene estruso (spessore 40 mm) (Figura 3.4). Un ulteriore strato esterno sarà costituito da un foglio di alluminio per ridurre l'influenza dell'irradiazione.

3.5.1.1 Scelta dei materiali

Inizialmente la scelta del materiale principale per isolare l'esperimento era ricaduta su poliuretano a celle chiuse, per cercare di limitare il più possibile il fenomeno del degasamento. Infatti gli isolanti a celle chiuse sono caratterizzati dal fatto che, una volta soggetti al fenomeno di degasamento dovuto alle diverse concentrazioni di gas fra l'ambiente esterno ed il gas contenuto nelle celle, diminuiscono di molto la loro efficienza come isolante. Inoltre il materiale ideale era difficilmente ottenibile in quantità consone all'utilizzo che effettivamente serviva, dunque è stato deciso di far ricadere la scelta su un isolante a celle aperte, comunemente disponibile in negozi di ferramenta ad esempio, ma che soprattutto aveva come vantaggio il fatto che molti esperimenti BEXUS passati lo avessero già impiegato con ottimi risultati.

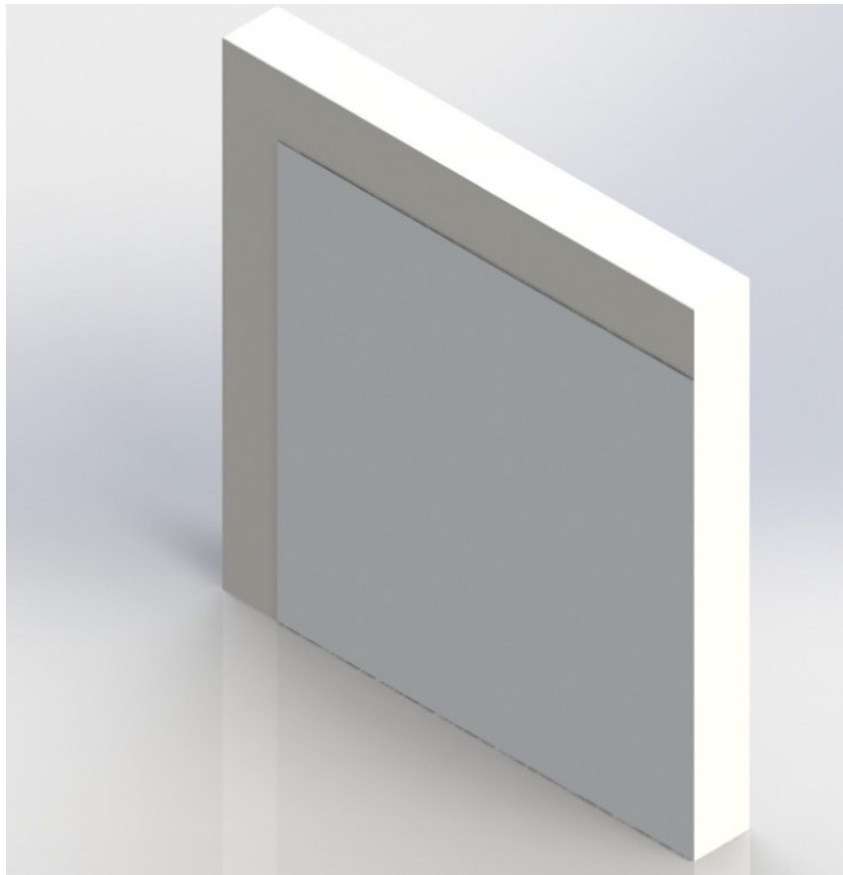


Figura 3.4: Vista laterale di un pannello esterno: Polistirene e foglio in alluminio

3.5.2 Treccia in rame

Ipotizzando una conducibilità termica di $\alpha_{Cu} = 390 \frac{W}{mK}$ e una superficie complessiva di $7,8 \cdot 10^{-5} m^2$, mantenendo la temperatura della pompa vicina ai 25-30 °C e ipotizzando che il tubo di alluminio sia costantemente mantenuto a circa 20-25°C, per rilasciare il flusso termico di circa 6 W dalla pompa è necessaria una treccia di rame di circa 2,5 cm. Poiché la lunghezza della treccia potrebbe essere troppo corta per raggiungere il tubo, la sua superficie potrebbe essere variata per aumentare la lunghezza delle trecce. $q = 6W$ $L = 0,025m$

3.6 Soluzioni attive

3.6.1 Heaters

La tipologia di riscaldatore adottato è quella a foglietto o lamina. Questo tipo di riscaldatore è stato studiato per essere applicato su un ipotetico tubo di alluminio attraverso un ponte termico collegato alla piastra di base, dove il riscaldatore sarebbe stato attaccato, in modo che l'aria che fluiva all'interno venisse riscaldata. Questa è stata una possibile soluzione per consentire un migliore campionamento da parte dei filtri chimici, poiché la temperatura dei filtri dovrebb-

be essere compresa tra 10 °C e 25 °C per risultati affidabili durante la fase di raccolta degli inquinanti. L'effettivo utilizzo nel caso del tubo di alluminio non era necessario nelle fasi di test quindi si è deciso di applicarne uno sulla piastra di base e uno sulla pompa per controllare meglio quelle temperature, evitare il raffreddamento eccessivo quando la pompa è spenta e mantenere le temperature nel range necessario. Per la loro applicazione abbiamo utilizzato i materiali consigliati ovvero Kapton: il suo basso spessore garantisce grandi deformazioni per avvolgere efficacemente le superfici. Hanno una parete adesiva sensibile alla pressione (PSA) per facilitarne l'applicazione. Questi riscaldatori sono costruiti per funzionare tra -65 °C e 200 °C. La temperatura di picco può essere superiore a questi valori: per questo motivo, durante l'applicazione non si devono creare bolle per evitare punti caldi (danneggerebbe la superficie su cui è incollato il riscaldatore e anche il riscaldatore stesso). Per riscaldare la piastra, abbiamo adottato un riscaldatore con una resistenza di 127 ohm (Figure 3.5). Per garantire un buon accoppiamento abbiamo utilizzato una spatola di plastica: è importante applicare una pressione intensa permettendo alla colla di agire in maniera completa.

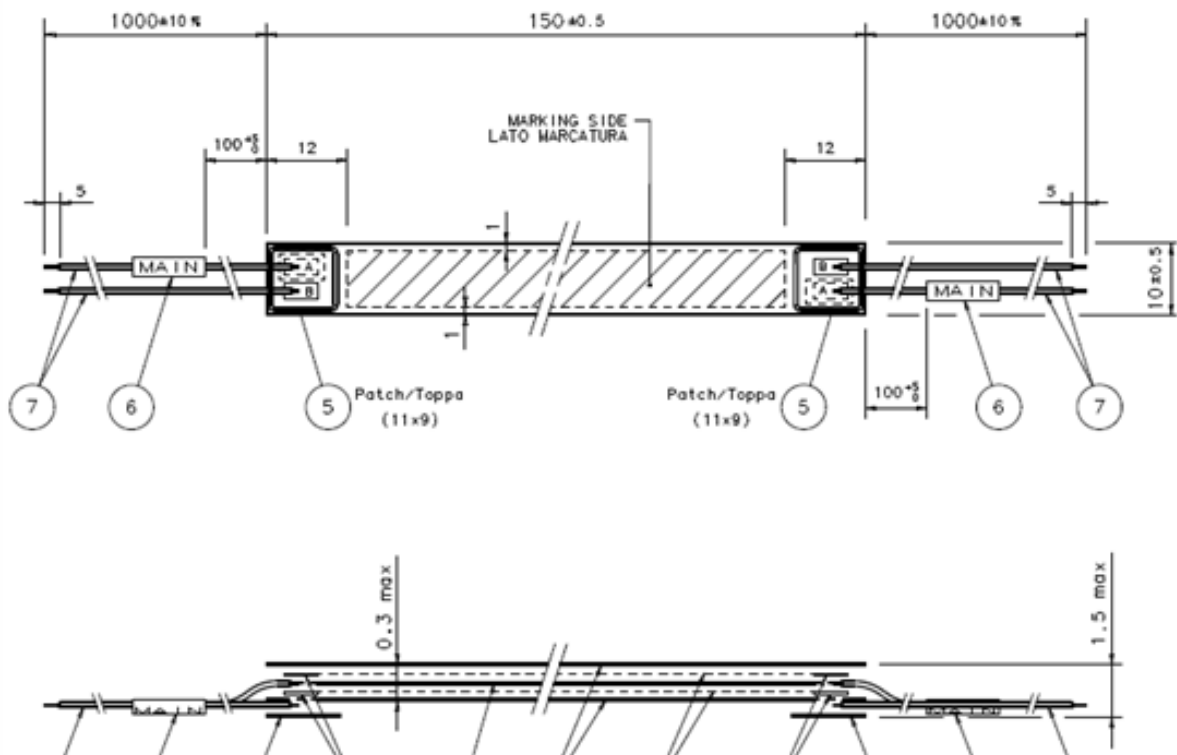


Figura 3.5: Heater da 127 ohm apposto sulla piastra di base

Il secondo riscaldatore è stato utilizzato per evitare il raffreddamento eccessivo della pompa: si attiva sotto comando dell'arduino quando la temperatura della pompa scende al di sotto del livello pericoloso. Dopo il test termico (Test n. 4), ci siamo resi conto che la temperatu-

ra della pompa sarebbe potuta scendere pericolosamente quando l'ambiente esterno è basse temperature per lungo tempo, anche con il riscaldatore, che era incollato sulla piastra di base, attivo. Per questo motivo, è stato deciso di aggiungere il riscaldatore sulla pompa, visto che la struttura della nuova pompa ha consentito di incollarlo direttamente sulla sua parte superiore (infatti nel modello precedente di pompa, non era presente una superficie in metallo abbastanza estesa da poter applicare un riscaldatore. Gli unici punti possibili erano in plastica, e dunque non adatti alle temperature raggiunte da questo).

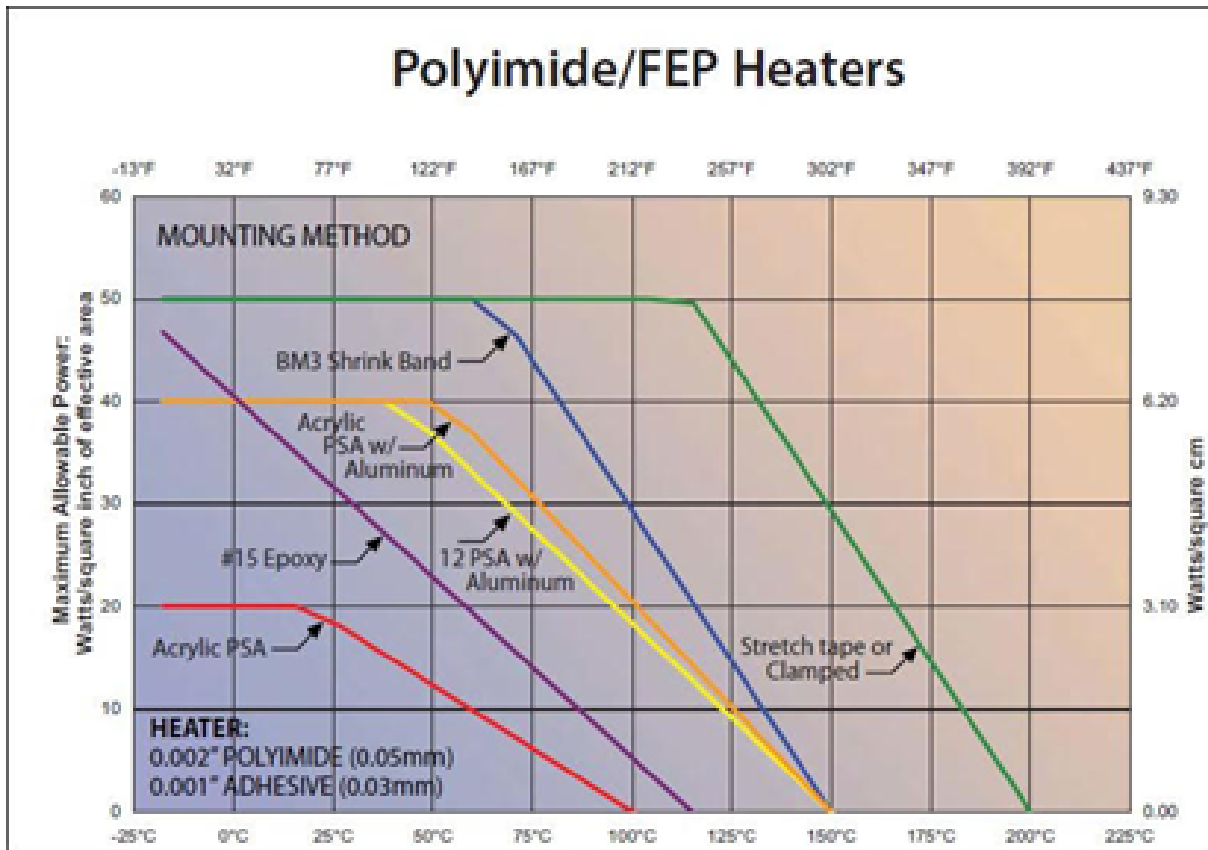


Figura 3.6: Grafico: Watt/cm quadrato in relazione alla temperatura superficiale

3.7 Rischi

Come per la parte pneumatica, anche il sottosistema termico è caratterizzato da diversi rischi, alcuni in comune con il sottosistema pneumatico (e.g. surriscaldamento della pompa) e dunque già trattati. Di seguito la lista:

TC40 Experiment electronics fail due to cold temperatures.

TC50 Internal temperature sensor failure.

TC60 The pump's overheating and we have difficulty switching it off.

TC80 Software fails to manage the thermal control system.

MS21 Pump failure due to low temperature.

MS50 The air temperature is not within the range required for sampling.

Tutti i rischi (in questa lista e non) sono stati adeguatamente tenuti in considerazione in fase di design al fine di eliminare quasi del tutto la probabilità che avvenissero o per attutire in maniera efficace gli eventuali effetti.

3.8 Test eseguiti

I test principali sulla parte termica sono il test della pompa in camera a vuoto ed il test termico:

3.8.1 Pompa in camera vuoto

La procedura seguita durante il test è la seguente:

- La pompa viene collegata alla porta pmw dell'Arduino per controllare il flusso d'aria al variare della pressione dell'aria esterna misurandola utilizzando il flussometro.
- La temperatura della pompa sarà monitorata da un sensore di temperatura.
- La pompa verrà accesa e spenta durante la diminuzione della pressione.
- La pompa funzionerà per almeno 30 minuti.

3.8.2 Test termico

La procedura seguita durante il test è la seguente:

- Posizionare tutti i componenti in una camera termica e portare la temperatura ad almeno -40°C (supponendo che il volo avvenga durante il giorno come richiesto).
- Controllare che tutti i sistemi funzionino come previsto.
- Verificare che tutti i componenti rimangano entro il loro intervallo di temperatura di sopravvivenza. Verificare il controllo della temperatura di tutti i componenti critici: pompa, filtri, PCU.

Durata della prova: 4 ore.

3.9 Problematiche

Una delle problematiche principali sorte durante la preparazione dei test è stata la mancanza di una camera termo-vuoto capace di simulare autonomamente le condizioni di temperatura e pressione che l'esperimento avrebbe incontrato durante il volo.

Per ovviare a tale mancanza, è stato deciso di testare il prototipo in una camera a bassa pressione nella quale è stato posizionato del ghiaccio secco al fine di portare la temperatura su un profilo molto simile a quello poi incontrato nella fase più dura del volo.

Capitolo 4

Campagna di lancio e risultati

4.1 Performance del dispositivo

La performance del dispositivo in generale è stata assolutamente soddisfacente: l'esperimento ha correttamente campionato gli inquinanti interessati. Dal punto di vista meccanico, il dispositivo ha retto bene il forte urto dell'atterraggio, e non ha riportato alcun tipo di danno né alla struttura né ai componenti interni. I filtri sono stati correttamente rimossi, sigillati e trasportati in sede di analisi, così come il canister.

	VOC1	VOC2	VOC3	VOC4	Sampling bag
Time [s]	855	855	855	855	1789
Litres [L]	0.7075	0.7225	0.7225	0.7225	0.8820
Temperature [C]	10.58	9.38	8.16	7.29	6.89
Humidity [H]	1.6	0.4	0.4	0.4	0.4
Initial pressure [mbar]	513.39	270.3	132.56	62.88	26.86
Final pressure [mbar]	290.85	144.32	68.57	29.98	17.54

Tabella 4.1: Performace Dispositivo

4.2 Performance del sistema pneumatico

Il sistema pneumatico ha ben performato durante tutto il volo, consentendo, come mostrato in tabella risultati, di far passare il giusto quantitativo di aria attraverso i filtri e nel canister.

4.3 Performance della parte termica

In linea generale, l'esperimento è risultato ben isolato ed i riscaldatori, quando attivi, hanno riportato le temperature dei vari componenti nei range operativi. Purtroppo uno dei maggiori obiettivi dell'esperimento, ovvero il mantenere l'aria passante per i filtri nell'intervallo fra 10-25° C non è stato rispettato a causa di decisioni dettate dal timore di consumare in maniera troppo veloce la riserva di energia elettrica. Infatti tale requisito risulta rispettato solo per il primo filtro, mentre, seppur di poco, gli altri filtri risultano fuori dal range nominale utile a considerare la misurazione ottimale. L'aspetto positivo è che alla fine del volo l'energia non era ancora esaurita; ne consegue che una migliore gestione delle riserve di energia in merito all'utilizzo dei riscaldatori avrebbe consentito il raggiungimento dell'obiettivo anche con le condizioni attuali del dispositivo.

4.4 Dati raccolti

Durante il volo sono stati registrati i dati sulla temperatura esterna e sulla quella dell'aria nel primo collettore. Di seguito i profili raccolti:

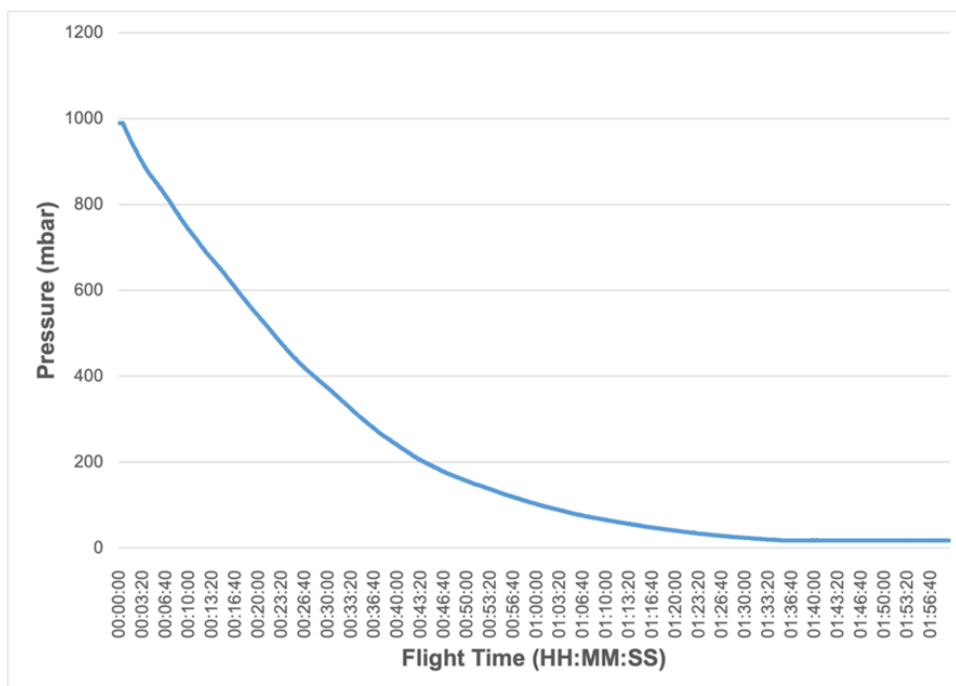


Figura 4.1: Pressione registrata durante il volo

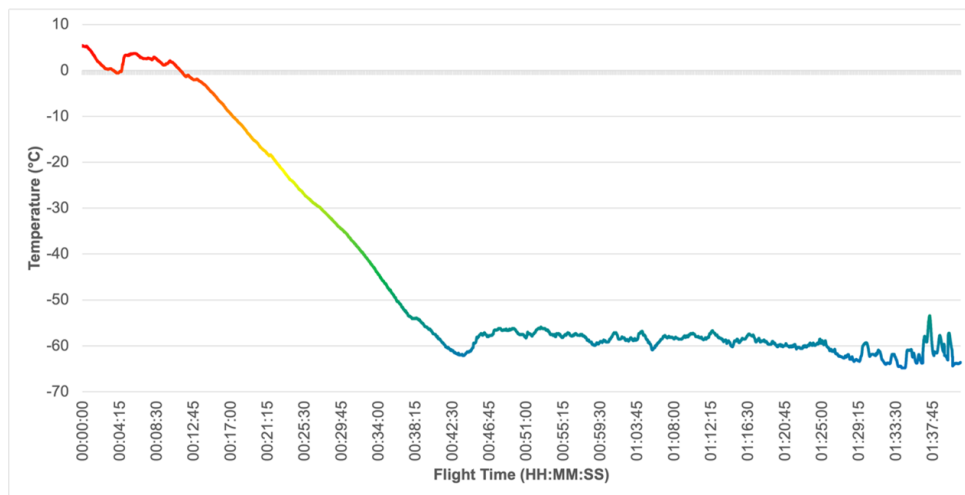


Figura 4.2: Temperatura esterna misurata in volo

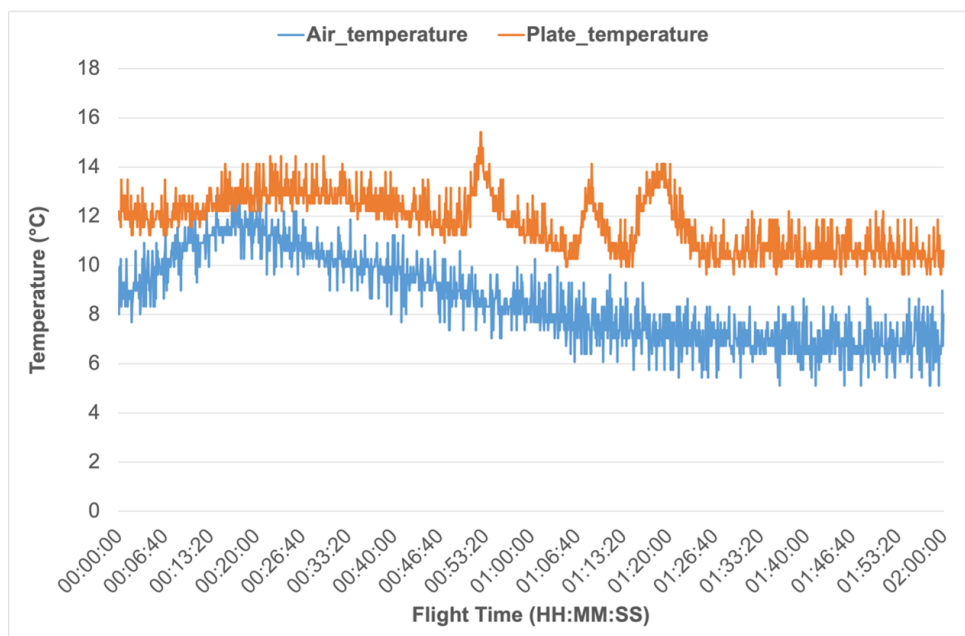


Figura 4.3: Temperatura interna misurata in volo

Dalla Figura 4.2 si può notare come la temperatura esterna dopo una certa altezza sia rimasta intorno ai -60°C , ovvero la temperatura prevista in fase di design, validando dunque la ricerca alla base. Dalla Figura 4.3 invece si nota come dal checkpoint dei 40 minuti la temperatura scenda sotto i 10°C , uscendo dunque dal range di validità del campionamento dei filtri, la cui efficienza diminuisce a causa dei diversi valori dei coefficienti di assorbimento dei suoi componenti. Ai fini delle misure, i risultati ottenuti dal secondo filtro in poi non sono da scartare ma da contestualizzare facendo riferimento ai dati di temperatura e pressione. Dal punto di vista della bontà del design invece, una maggiore quantità di energia disponibile o una maggiore esperienza nel gestire le risorse avrebbero probabilmente permesso la permanenza nei range ottimali.

4.5 Materiale scientifico prodotto

Grazie ai risultati ottenuti, il team è riuscito a produrre diverso materiale scientifico e a presentare il proprio operato anche a platee prestigiose. Fra i documenti prodotti e presentati, spiccano quelli prodotti per:

- IAC Dubai
- IEEE
- AIDAA
- SSEA
- PAC Symposium

Capitolo 5

Conclusioni

In questo elaborato è stato esposto come è avvenuta la fase di progettazione dei sottosistemi termico e pneumatico del dispositivo O-Zone, esperimento parte del programma competitivo BEXUS (cicli 30/31) sponsorizzato da ESA, SSC, DLR, ZARM ed SNSA. Tale programma prevede il volo di una struttura in alluminio sulla quale sono installati gli esperimenti (circa 5 per volo) di team di studenti europei. La struttura in alluminio è trasportata da un pallone stratosferico e arriva fino a 25-30 km di altezza per una durata di volo che va dalle 2 alle 5 ore. L'esperimento O-Zone è un dispositivo economico e compatto capace di campionare gli inquinanti nell'aria in maniera dinamica, attraverso l'impiego di filtri chimici ed un sacchetto di campionamento da riempire d'aria da analizzare in seguito al recupero dell'esperimento. Il dispositivo inoltre riesce a dividere il campionamento in più fasi a seconda dell'intervallo di altezza in cui si trova, in modo di poter creare delle curve di dispersione degli inquinanti con i dati raccolti.

I sottosistemi termico e pneumatici sono stati sviluppati a partire dai requisiti operativi richiesti dall'esperimento, fra cui:

- Capacità di mantenere tutti i componenti nel proprio range di temperatura operativa;
- Capacità di garantire la corretta aspirazione dell'aria durante l'intero durata del volo.

Il contesto ambientale in cui si inserisce tale sviluppo è quello di Kiruna in Svezia, lungo un profilo di volo che può arrivare a 30 km di altezza. Le condizioni al contorno più critiche sono dunque la temperatura, che può arrivare fino a -70°C , e la pressione che arriva a pochissimi mbar.

Durante la fase di sviluppo e testing sono emerse diverse problematiche prontamente ri-

solte, quali ad esempio:

- la necessità di introdurre un sistema di creazione di vuoto all'interno del canister per evitare che esso si gonfiasse al momento sbagliato e dunque avesse al suo interno aria precedente all'inizio dell'intervallo di volo assegnato;
- l'introduzione di una treccia in rame per recuperare il calore dissipato dall'elettronica, reindirizzandolo su componenti critici senza dover attingere alle limitate scorte di energia elettrica per attivare gli heaters;
- ricerca di una soluzione strutturale che consentisse da un lato una generale solidità e protezione termica dei componenti interni senza però gravare troppo sul peso e sul costo;
- generali problemi di organizzazione dovuti al periodo in cui il progetto è stato svolto, ovvero in piena pandemia e dunque con accesso molto limitato ai laboratori.

Fra le competenze trasversali più utili sfruttate in questo programma si notano:

- Ampio utilizzo di Concurrent Engineering;
- Capacità di lavorare in gruppo in maniera efficace ed efficiente;
- Capacità di organizzazione del lavoro dal punto di vista gestionale;
- Ampio utilizzo di strumenti CAD e dei principi di Digital Manufacturing, fattori chiave in quanto la gran parte del progetto è stato sviluppato durante il periodo di lockdown.

In conclusione, il dispositivo ha correttamente svolto gli obiettivi posti, e dunque il progetto O-Zone si è rivelato un successo in ogni sua parte. Il dispositivo inoltre, in seguito alla caduta controllata dai 27 km di altezza raggiunti, non ha riportato danni nonostante l'elevata velocità raggiunta, con picchi di 70 km/h.

Bibliografia

- [1] Simone Sandon-Giovanni Righi Mauro Pulice Carlotta Segna Luigi Antoniazzi David Magnani Luca Vitali Antonino Pitarresi Matilde Pavan Marco Furiato Stefano Lopresti Andrea Conte Daniele Panariti Gasperino Kamsi Federico Palisca Federico Toson, Dumitrita Sandu. Ozone monitoring and pollution control, 2021. <http://rexbexus.net/wp-content/uploads/2022/03/BX30O-ZONESEDv5-110Feb22.pdf>/,.
- [2] ultima versione rilasciata da Armelle Frenea-Schmidt. Bexus user manual, 2021. <https://rexbexus.net/bexus/bexus-user-manual/>,.

*“A lesson without pain is meaningless.
That’s because no one can gain without sacrificing something.
But by enduring that pain and overcoming it,
he shall obtain a powerful, unmatched heart.
A fullmetal heart.”*

– Fullmetal Alchemist, capitolo 108